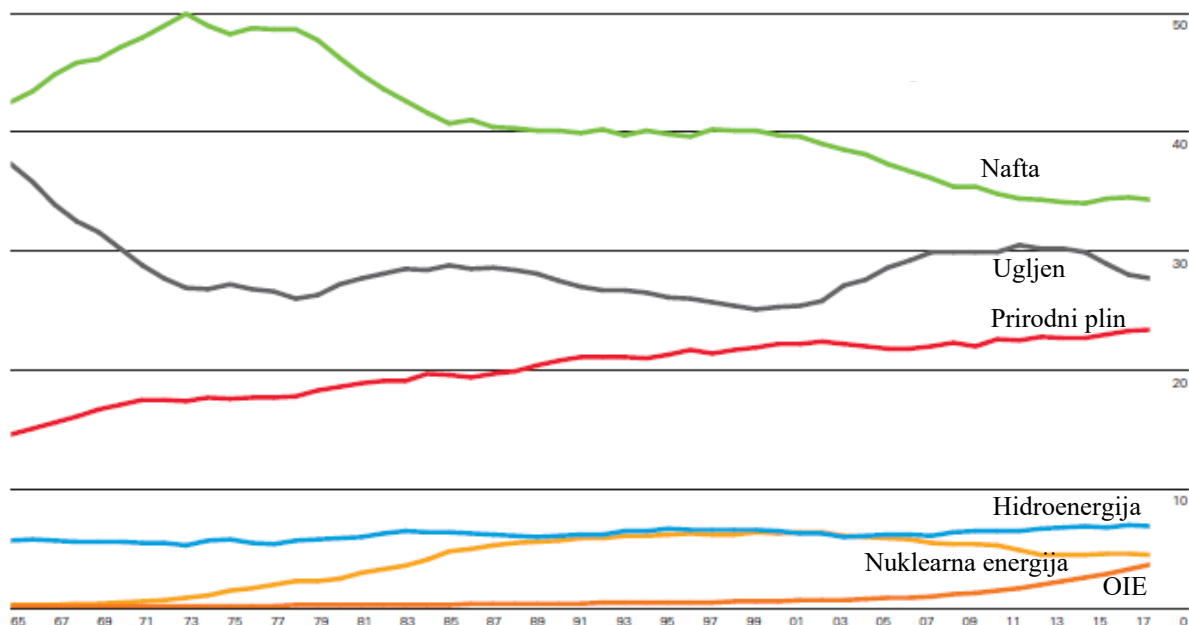


Obnovljivi izvori energije

Obnovljivi izvori energije (dalje u tekstu OIE) su, kao što je to već opisano kod podjele oblika energije, oni primarni izvori energije koji nastaju kružnim procesima u prirodi te se stalno obnavljaju i za razliku od fosilnih goriva ne mogu se potrošiti. Upravo na temelju činjenice da su zalihe fosilnih goriva konačne, a još važnije od toga da fosilna goriva svojim izgaranjem emitiraju ugljični dioksid u atmosferu, u zadnjih dvadesetak godina došlo je do snažnog zamaha korištenja obnovljivih izvora energije u svijetu. Jedan od glavnih argumenata za uvođenje OIE je problem efekta staklenika tj. imperativ smanjenja emisija stakleničkih plinova posebno iz energetske transformacije (v. poglavlje „Staklenički plinovi). Drugi dodatni argument za njihovo uvođenje je katastrofa koja se dogodila 11. ožujka 2011. u japanskoj nuklearnoj elektrani Fukushima koju je potopio razorni tsunami izazvan snažnim potresom u tom području prouzročivši kontaminaciju mora radioaktivnošću u širokom krugu oko tog područja, čak do obala SAD-a. Taj događaj poslužio je u mnogim zemljama, uključujući i Japan, kao argument za opasnost od nuklearne energije, iako je ona sama po sebi CO₂ neutralan izvor električne energije. Katastrofa je potaknula ideju o potpunom postupnom zatvaranju nuklearnih postrojenja. Tako stvoreni manjak električne energije uz jednaku potražnju doveo je do preslagivanja globalne energetske potrebe, posebno u smislu povećane potražnje za prirodnim plinom u Japanu. U Njemačkoj je kancelarka Angela Merkel donijela političku odluku o postupnom zatvaranju njemačkih nuklearnih elektrana i njihovim nadomještanjem OIE (program nazvan *Energiewende*).

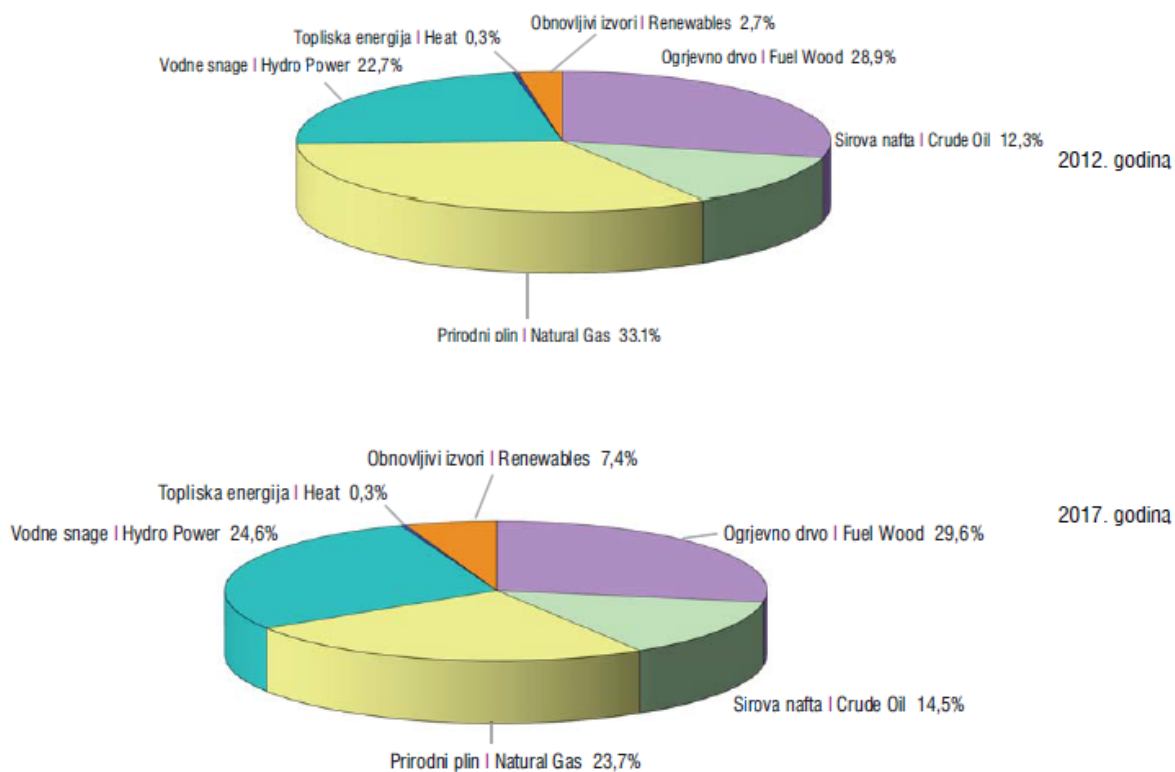
Zastupljenost OIE u primarnim oblicima energije i u proizvodnji transformiranih oblika energije

U prethodnim poglavljima već je korištena statistika koja je govorila o udjelima pojedinih oblika primarne energije u ukupnoj potrošnji, već ovisno o tome s kojeg je aspekta tema obrađivana, pa se možda neki pokazatelji i ponavljaju. Slika 1. Prikazuje udjele pojedinih oblika primarne energije u Svijetu u dugom vremenskom slijedu, od 1965. do 2017. godine.



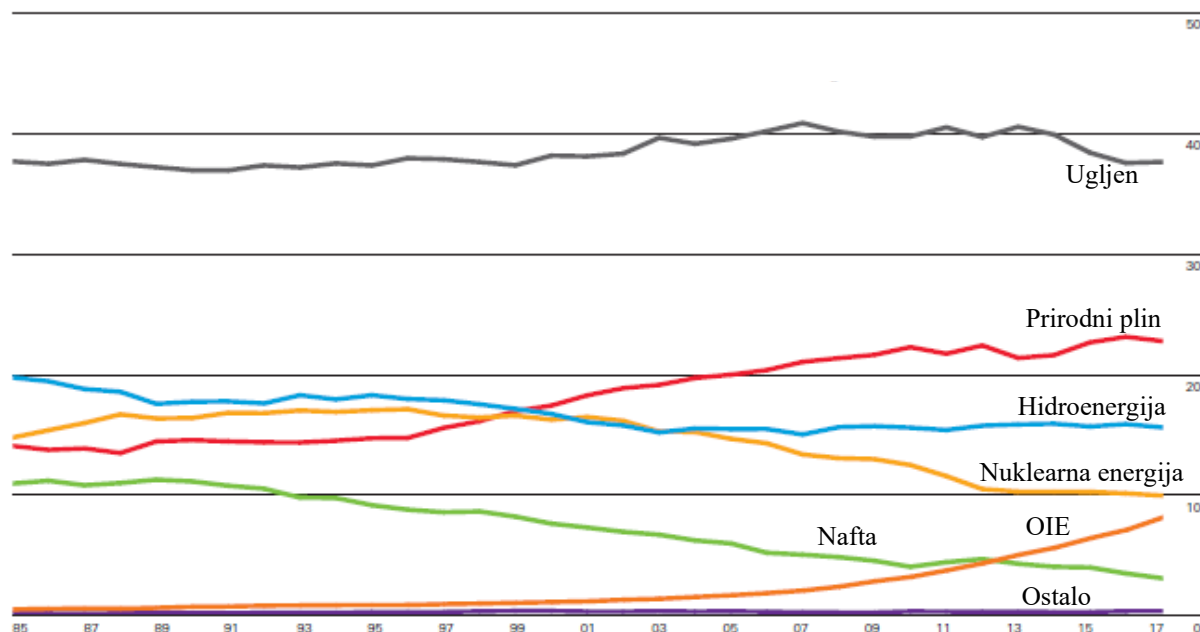
Slika 1. Udio pojedinih oblika primarne energije u Svijetu (%) (Izvor: BP Statistical Review of World Energy 2017.)

Uz dugotrajni pad udjela nafte, kolebanja ugljena, blagog rasta prirodnog plina, gotovo konstantne hidroenergije i blago padajuće nuklearne energije, jedino OIE iskazuju eksponencijalni rast u zadnjih 15. godina. Usprkos toj činjenici vidljiv je njihov dosta skroman udio od približno 4% u 2017. Slika 2. prikazuje stanje u Hrvatskoj gdje udio OIE u njihovoj ukupnoj proizvodnji gotovo utrostručen u odnosu na 2012. i u 2017. iznosi 7,4%. Zgodno je uočiti približno isti udio sirove nafte, hidroenergije, drva i toplinske energije (geotermalni izvori) uz znatan pad prirodnog plina od gotovo 10%.



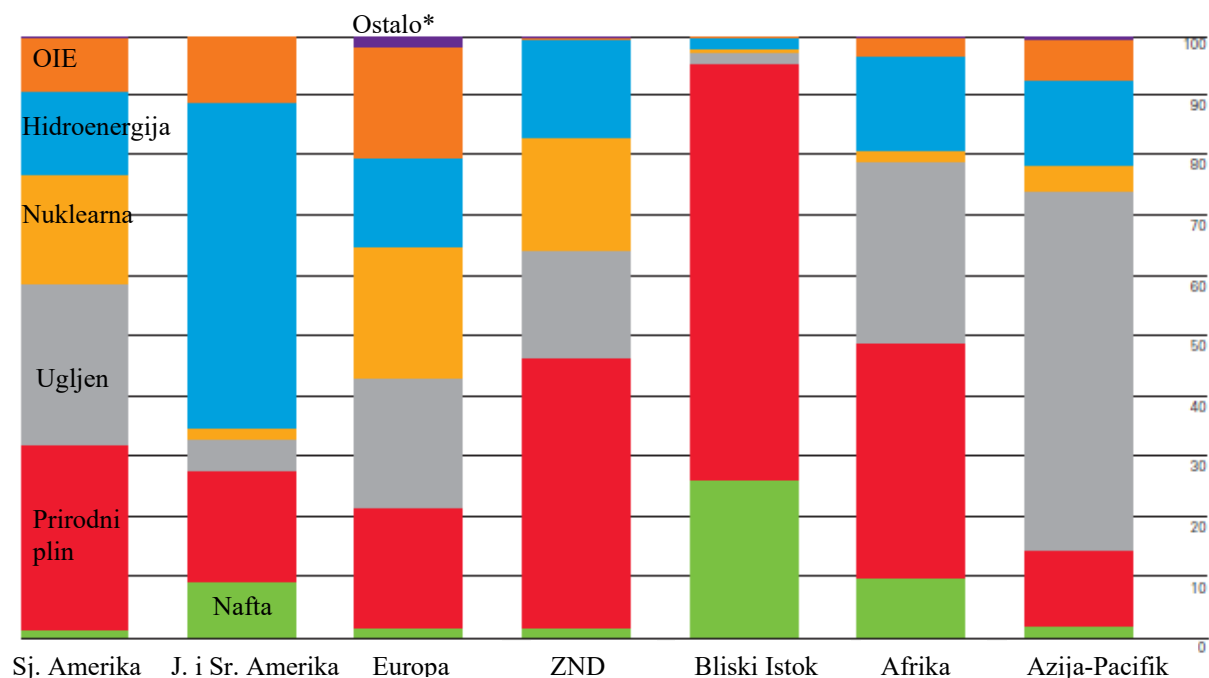
Slika 2. Udio OIE u ukupno proizvedenoj primarnoj energiji u Hrvatskoj u 2012. i 2017. (Izvor: Energija u Hrvatskoj 2017. – usp. Slika 2., poglavlje „Hidroenergetska postrojenja“)

Pri razmatranju OIE posebno je interesantan njihov udio u proizvodnji transformiranih oblika energije, posebno električne energije. U Hrvatskoj, a i drugdje, dominira korištenje OIE za proizvodnju električne energije. Kakva je situacija u svijetu pokazuje slika 3., a izvor je u ovim materijalima često citiran godišnji izvještaj British Petroleuma. Za razliku od, na prvi pogled sličnog dijagrama prikazanog slikom 1. ovdje su odnosi potpuno drugačiji. I dalje u proizvodnji električne energije kao primarni energent dominira ugljen uz blagi pad zadnje tri godine, pa prirodni plin uz kontinuirani rast zadnjih dvadesetak godina, hidroenergija i nuklearna energija uz kontinuirani pad zadnjih dvadesetak godina. Posebno je uočljiv kontinuirani pad korištenja (prerađevina) nafte u zadnjih tridesetak godina s udjelom od cca. 4% u 2017. Razlog tome leži u činjenici da je sirova nafta vrijedna sirovina za niz petrokemijskih proizvoda te motorna goriva. Istovremeno, kao i na slici 1. uočljiv je eksponencijalni porast udjela OIE u proizvodnji električne energije, ali ipak na trenutno skromnih 8% na svjetskoj razini.



Slika 3. Udio pojedinih oblika primarne energije u proizvodnji električne energije u Svijetu (%) (Izvor: BP Statistical Review of World Energy 2017.)

Prethodno iznesena statistika vrlo je usrednjena pa je radi boljeg uvida u zastupljenost OIE po regijama bolje pogledati sliku 4. gdje su vidljiva velike razlike. OIE su najzastupljeniji u Europi (20%), Južnoj (12%) i Sjevernoj Americi (8%), potom Azija i Pacifik (tu su Japan i Kina među inima), a najslabije su zastupljeni u Africi, Bliskom Istoku i ZND-u (Rusija i ex SSSR).



Slika 4. Udio pojedinih oblika primarne energije u proizvodnji električne energije po regijama (%) (Izvor: BP Statistical Review of World Energy 2017.) (ZND-Zajednica Neovisnih Država), *reverzibilne hidroelektrane, otpad

Podjela OIE

Prema važećem hrvatskom Zakonu o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji OIE (NN100/15, 123/16, 131/17) se definiraju kao (čl.4., st.(2)): „obnovljivi nefosilni izvori energije:

- aerotermalna,
- energija iz biomase,
- energija iz biotekućine,
- energija mora,
- hidroenergija,
- energija vjetra,
- geotermalna i hidrotermalna energija,
- energija plina iz deponija otpada, plina iz postrojenja za obradu otpadnih voda i bioplina,
- Sunčeva energija i
- biorazgradivi dio certificiranog otpada za proizvodnju energije na gospodarski primjeren način sukladno propisima iz upravnog područja zaštite okoliša.“

Ovdje je potrebno pojasniti neke pojmove:

- nefosilni izvori energije: u fosilnim izvorima (kako su prije definirani i opisani) sadržana je akumulirana (obnovljiva) sunčeva energija kroz nastanak biljnih i životinjskih organizama koji su u odgovarajućim uvjetima i kroz desetine milijuna godina postali fosilna goriva,
- aerotermalna energija predstavlja toplinsku energiju sadržanu u okolnom zraku koja se može koristiti u dizalicama topline,
- energija iz biotekućine je podgrupa energije iz biomase kao i biomasa i deponijski plin,
- energija mora predstavlja energiju valova i plime i oseke (nositelji potencijalne energije),
- hidrotermalna energija predstavlja toplinsku energiju sadržanu u površinskim vodama i moru, slično poput aerotermalne, ali za razliku od nje nejasno na koji bi se način iskorištavala i kada bi se to trebalo dogoditi,
- Ostali oblici jasni su iz svakodnevnog života i njihove uobičajene percepcije.

Zbog pojašnjenja zgodno je naglasiti da spomenuti zakon za potrebe statističkog praćenja korištenja koristi podjelu iz starog zakona koja je puno jasnija (čl. 6. st. (1)):

1. energiju sunca
2. energiju vjetra
3. hidroenergiju
4. geotermalnu energiju
5. energiju biomase te
6. nespacificirane i ostale obnovljive izvore energije.

Prethodno navedene podjele mogu zbunjivati zbog potrebe tumačenja pojedinih pojmova. Neka ipak bude navedena još jedna logična podjela OIE koja je utemeljena na našem poznavanju određenih pojmova:

- Sunčeva energija,
- energija vjetra,
- hidroenergija,
- biomasa, otpad i biogoriva,
- geotermalna energija,
- energija plime i oseke, morskih struja i valova,
- vodik i gorive ćelije

Svim OIE je zajedničko da se ne mogu skladištiti, s iznimkom vode (hidroenergija) i da su promjenljivog i nepredvidivog intenziteta. Ovdje opet postoje neke iznimke: intenzitet Sunčevog zračenja moguće je izmjeriti i točno odrediti. Prisjetimo se da je položaj Sunca na nebu moguće točno odrediti u svakom trenutku i da ovisi o danu u godini (godišnje doba) i satu u danu. Ovdje Sunce promatramo kao nebesko tijelo koje se giba oko Zemlje koja u ovom slučaju miruje (geocentrični sustav) iako je u stvarnosti naravno potpuno obrnuto jer se zemlja giba oko Sunca. Ono što ne možemo predvidjeti su oblačni i magloviti dani kada ima slabog ili nikakvog efekta od Sunčevog zračenja. Vjetar ima kao glavnu karakteristiku nepredvidivost, kada će puhati, kolikom brzinom i iz kojeg smjera. Biomasa općenito ima dobre karakteristike poput fosilnih goriva obzirom da se može skladištiti, neovisno o kojem se obliku radi, a prilikom pretvorbe energije kroz proces izgaranja može njome i dobro upravljati. Ovo su ujedno i tri najvažnija oblika OIE za Hrvatsku koji su do sada značajno zastupljeni u segmentu OIE. Kada se govori o otpadu kao OIE treba se kloniti pogrešnih zaključaka da je otpad nešto dobro i korisno. Otpad je nusproizvod potrošačkog društva u kojem je prije nego je to postao uložena određena količina energije i sirovine. Glavni cilj treba biti smanjivanje količine otpada jer njegovo zbrinjavanje, bez obzira na koji način i koliko god tehnologije bile napredne, ne može ni približno vratiti ono što je u njega uloženo. Energija plime i oseke i valova je za prilike na Jadranskom moru slabo izgledna opcija., ali tek za informaciju radi se o nositeljima potencijalne energije.

U nastavku najviše pažnje posvetit će se Sunčevoj energiji, energiji vjetra i biomasi kao najzastupljenijim kategorijama OIE u Hrvatskoj. Hidroenergija je obrađena u posebnom poglavlju.

Sunčeva energija

Sunce svoju energiju emitira u Svemir pa tako i prema planetama Sunčevog sustava, uključujući Zemlju; u vidljivom i nevidljivom dijelu spektra putem elektromagnetskih valova (valna teorija zračenja Sunca). Osim što život na Zemlji ne bi bio moguć bez Sunca, Sunčevu energiju ljudski rod koristio je od pamtivijeka ponajviše kao izvor toplinske energije.

Sunčevo zračenje (energija) mogu se iskorištavati na dva načina: pasivno i aktivno.

Pasivno iskorištavanje Sunčeve energije

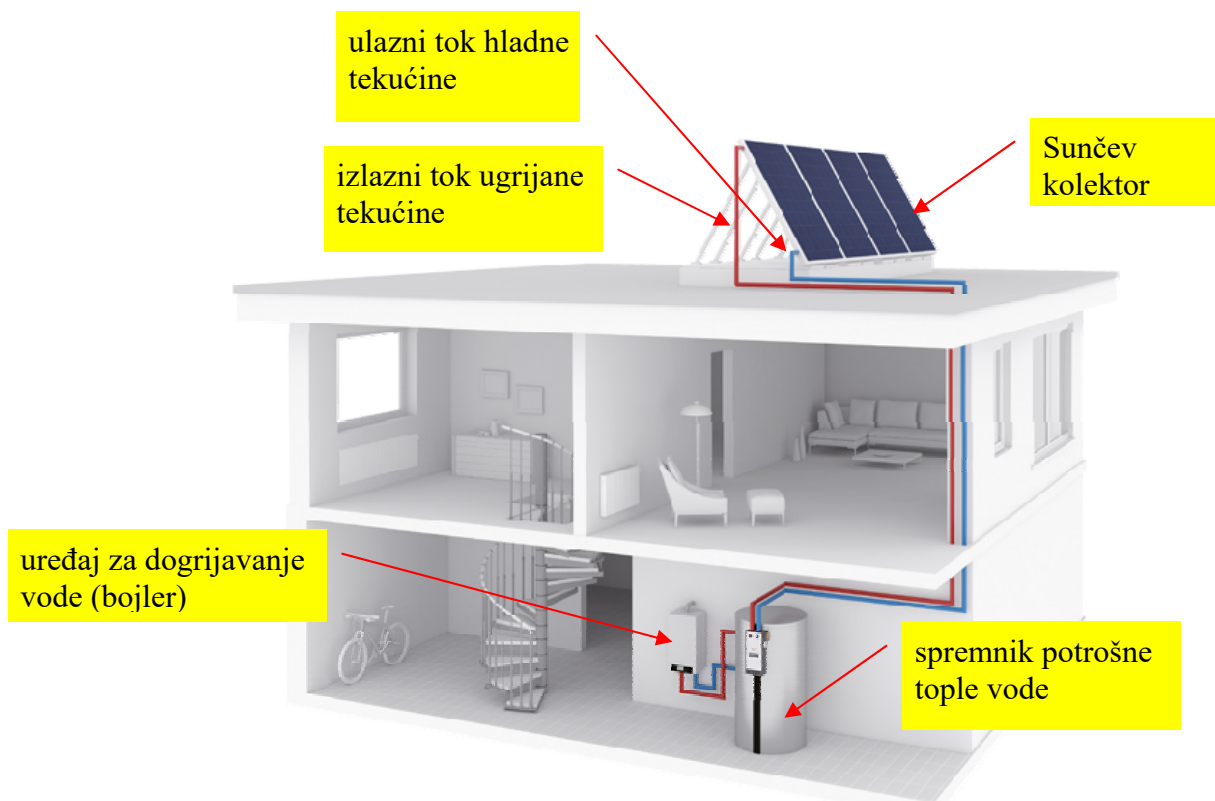
Pasivni način podrazumijeva korištenje toplinskog dijela spektra za zagrijavanje prostora ili nekog drugog medija (npr. vode). Zagrijavanje prostora svodi se na pravilan smještaj ostakljenih ploha koje u zimskom razdoblju niže putanje Sunca trebaju apsorbirati što više topline, a u ljetnom razdoblju kroz te iste površine treba što više onemogućiti ulaz topline što se rješava zasjenjivanjem tih površina, listopadnim raslinjem ili raznim izvedbama nepropusnih sjenila. Ove izvedbe spadaju u domenu arhitekture.

Aktivno iskorištavanje Sunčeve energije

Ako se uz pomoć sunca zagrijava voda ili neki drugi medij onda se radi o sustavima koji se sastoje od sunčevog kolektora koji služi za skupljanje (apsorpciju) dozračene energije i odgovarajućeg sustava cijevi koje ugriyani medij odvede do potrošača toplinske energije (potrošna topla voda i/ili grijanje prostora). U ovakvim sustavima nužno je ugraditi i pumpu potrebnu za recirkulaciju radnog medija koja za pogon treba elektromotor odn. električnu energija pa se zbog korištenja električne energije u literaturi ti sustavi nazivaju aktivnim sustavima bez obzira što im je primarno iskorištenje toplinskog dijela spektra sunčevog

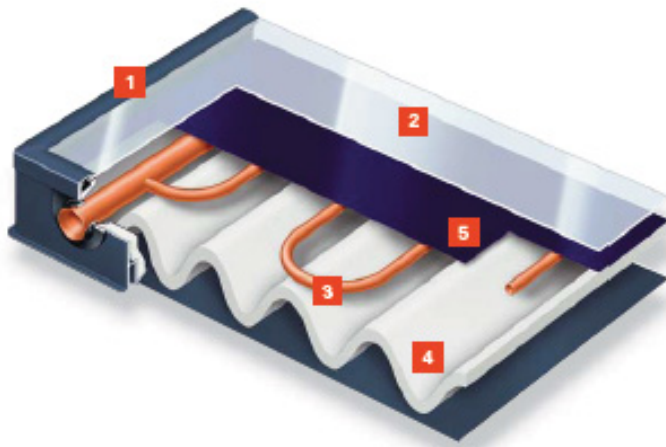
zračenja. Jedno od mogućih rješenja prikazano je na slici 5. njemačkog proizvođača opreme, tvrtke Viessmann.

Sustav se sastoji od Sunčevog kolektora, detaljnije prikazanog slikom 6., koji se nalazi na krovu zgrade. Plavo je označen ulazni (povratni) tok hladne solarne tekućine u kolektor, a crveno izlazni tok suncem zagrijane solarne tekućine. Solarna tekućina nije ništa drugo doli voda u koju je dodan antifriz kako bi se izbjeglo smrzavanje tijekom zimskih mjeseci. Zagrijana solarna tekućina odlazi u spremnik potrošne vode, detaljnije prikazanog slikom 7., u kojem putem izmjenjivača topline toplinu predaje vodi koju je potrebno zagrijati. Obzirom da uglavnom nije moguće osigurati dovoljnu količinu topline korištenjem isključivo sunčevog kolektora, potrebno je imati i uređaj za dogrijavanje vode (kolokvijalno bojler) koji koristi npr. prirodni plin, električnu energiju ili biomasu.



Slika 5. Tehničko rješenje za iskorištavanje Sunčevog zračenja uz pomoć kolektora (izvor: www.viessmann.hr)

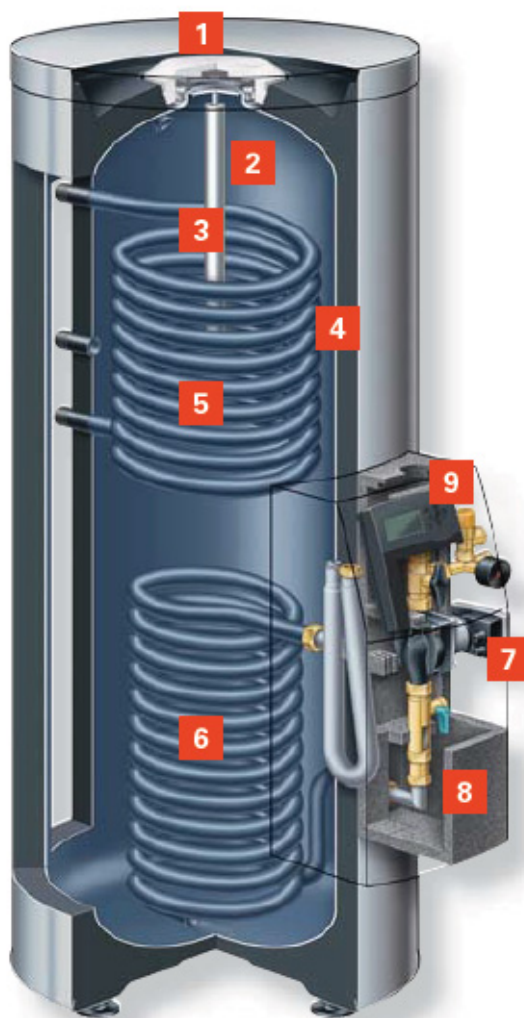
Slika 6. prikazuje osnovne dijelove Sunčevog kolektora s njihovim opisom. Cijevna zavojnica (3) je ona koja apsorbira toplinu dozračenu Sunčevim zrakama i tako grije solarnu tekućinu koja kroz nju struji. Od ostalih dijelova može se još istaknuti pozicija (5) tj. visokoapsorbirajući pokrovni lim koji ima veliku moć apsorpciju sunčevih zraka odn. toplinske energije koju dalje propušta prema cijevnoj zavojnici.



1. Okvir i držač Sunčevog kolektora
2. Stakleni pokrov kolektora
3. Cijevna zavojnica koja apsorbira toplinu
4. Toplinska izolacija
5. Visokoapsorbirajući pokrovni lim koji apsorbira Sunčevo (toplinsko) zračenje

Slika 6. Presjek Sunčevog kolektora tipa Vitosol 200-FM (izvor: www.viessmann.hr)

Spremnik tople vode prikazan je slikom 7. na kojoj je vidljiv princip funkcioniranja cijelog sustava.



1. Otvor za čišćenje i kontrolu
2. Spremnik
3. Anoda za antikorozijsku zaštitu
4. Toplinska izolacija
5. Izmjenjivač topline-cijevna zavojnica za dogrijavanje vode spojena uređaj za zagrijavanje vode (bojler)
6. Izmjenjivač topline-cijevna zavojnica za zagrijavanje vode spojena na Sunčev kolektor
7. Pumpa
8. , 9. Regulacijska oprema

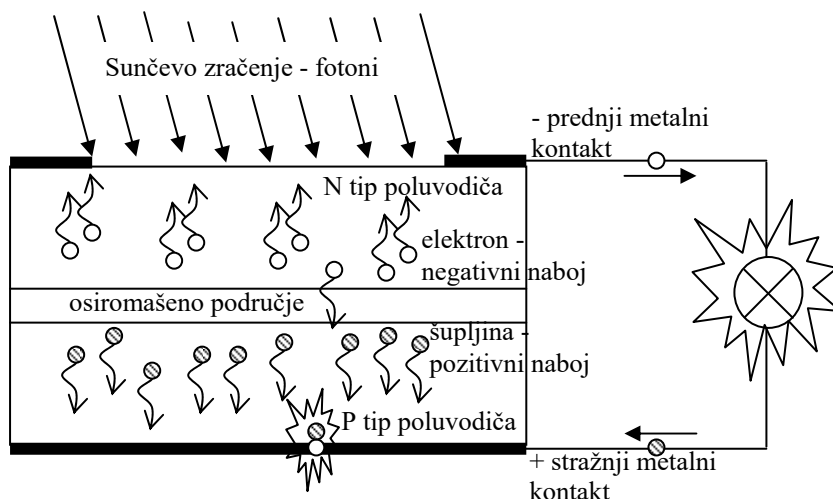
Slika 7. Spremnik tople vode tipa Vitocell 100-B (izvor: www.viessmann.hr)

Pri dnu spremnika nalazi se zavojnica (6) kroz koju struji u sunčevom kolektoru ugrijana solarna tekućina. Ta zavojnica nalazi se u zoni hladne vode koja ulazi kako se troši potrošna topla voda (PTV) koja se odvodi s vrha spremnika. Ugrijana solarna tekućina voda predaje toplinu potrošnoj vodi i ohlađena se vraća u kolektor. Zagrijana voda diže se prema vrhu spremnika gdje je postavljena zavojnica koja služi za dogrijavanje PTV posredstvom posebnog radnog medija, do željene temperature. Radni medij koji struji kroz zavojnicu zagrijava se u uređaju za zagrijavanje (bojleru) kako je prethodno opisano.

Konfiguracija prikazana slikom 5. predstavlja uobičajeni način iskorištavanja Sunčevog zračenja za proizvodnju toplinske energije. Vidljivo je da takav sustav ne može funkcionirati bez dodatnog uređaja za dogrijavanje vode koji koristi neki primarni energent (prirodni plin, UNP, lož ulje ili biomasu) ili transformirani oblik isključivo električnu energiju. Količina dozračene Sunčeve energije izrazito je ovisna o godišnjem dobu i svoje maksimume postiže od lipnja do kolovoza, a prije i nakon toga razdoblja je manja uz minimalne iznose između studenoga i veljače. Imajući to u vidu i uz činjenicu da su upravo zimski mjeseci oni u kojima je potreba za toplinskom energijom zbog grijanja prostora najveća može se zaključiti da je korist od Sunčeve energije u zimskim mjesecima vrlo skromna, možda tek nekoliko postotaka. Ipak, ako govorimo o korištenju Sunčeve energije za pripremu PTV situacija ipak značajno bolja. U zimskim mjesecima doprinos Sunčeve energije je i dalje skroman, ali zato je u ljetnim mjesecima moguće i gotovo u 100%-tnom iznosu zadovoljiti potrebe za toplinskom energijom, a u kasno proljetnom i rano jesenskom razdoblju taj doprinos može biti vrlo značajan.

Proizvodnja električne energije u fotonaponskim sustavima

Ovdje se radi o potpuno drukčijem načinu iskorištavanja Sunčevog zračenja u odnosu na prethodno opisano. Pod ovim pojmom smatra se proizvodnja električne energije temeljena na fotonaponskom efektu kojeg je 1839. godine otkrio Edmond Becquerel (1820. – 1891.). Sunčeva zraka tj. čestica svjetlosti zvana foton izaziva između dva tipa poluvodiča pojavu električnog napona odn. električne struje. Radi se o N tipu i P tipu poluvodiča. U prvom tipu gibaju se elektroni, a u drugom šupljine. Princip rada prikazan je slikom 8. Kako se radi o posebnom i zahtjevnom području fizike ovdje za to nema ni potrebe ni prostora pa detaljnije informacije možete potražiti negdje drugdje.



Slika 8. Princip djelovanja fotonaponskog efekta

Osnovni tipovi fotonaponskih (solarnih) ćelija odn. poluvodičkih elemenata od kojih su izrađeni dani su u tablici 1.

Tablica 1. Tipovi solarnih ćelija sa stupnjem iskorištenja

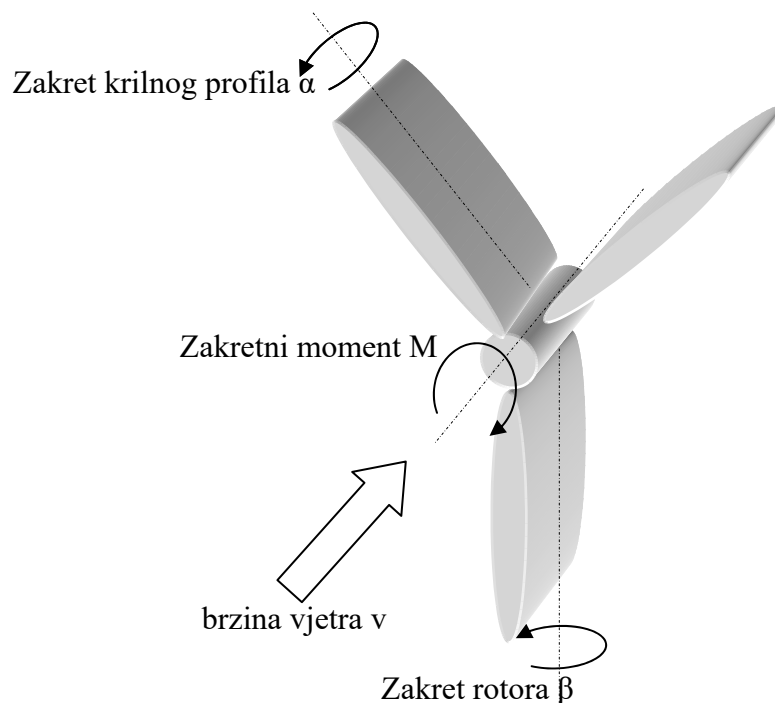
vrsta ćelije	iskorištenje η
monokristalna-Si ćelija	0,17
polikristalna-Si ćelija	0,15
amorfna-Si ćelija	0,09
CdS/Cu ₂ S	0,10
CdS/CdTe	0,12
GaAlAs/GaAs	0,24
GaAs	0,27

U tablici 1. uz tipove ćelija dan je i iznos iskorištenja ćelije η koji predstavlja omjer maksimalne snage solarne ćelije (W) i snage (W) Sunčeva zračenja na površinu ćelije. Podaci su preuzeti iz knjige Solarni sustavi (autor: Lj. Majdandžić, Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, 2010.). Tipovi ćelija karakterizirani su imenima kemijskih elemenata koji su navedeni a sam način njihova dobivanja i njihove karakteristike može se potražiti u literaturi uključujući i prethodno navedeni izvor. Bitno je uočiti vrlo nisko iskorištenje većine tipova ćelija.

Energija vjetra

Vjetar je nositelj kinetičke energije koja se može iskoristiti za dobivanje mehaničkog rada i naposljetku električne energije. Kroz povijest energija vjetra se koristila za pogon brodova i za proizvodnju mehaničke energije u vjetrenjačama koja je služila za npr. pogon pumpi i isušivanje močvara.

Današnja primjena vjetra, posebno kada se govori o energetici, spada u područje vrhunske tehnologije i odnosi se isključivo na proizvodnju električne energije



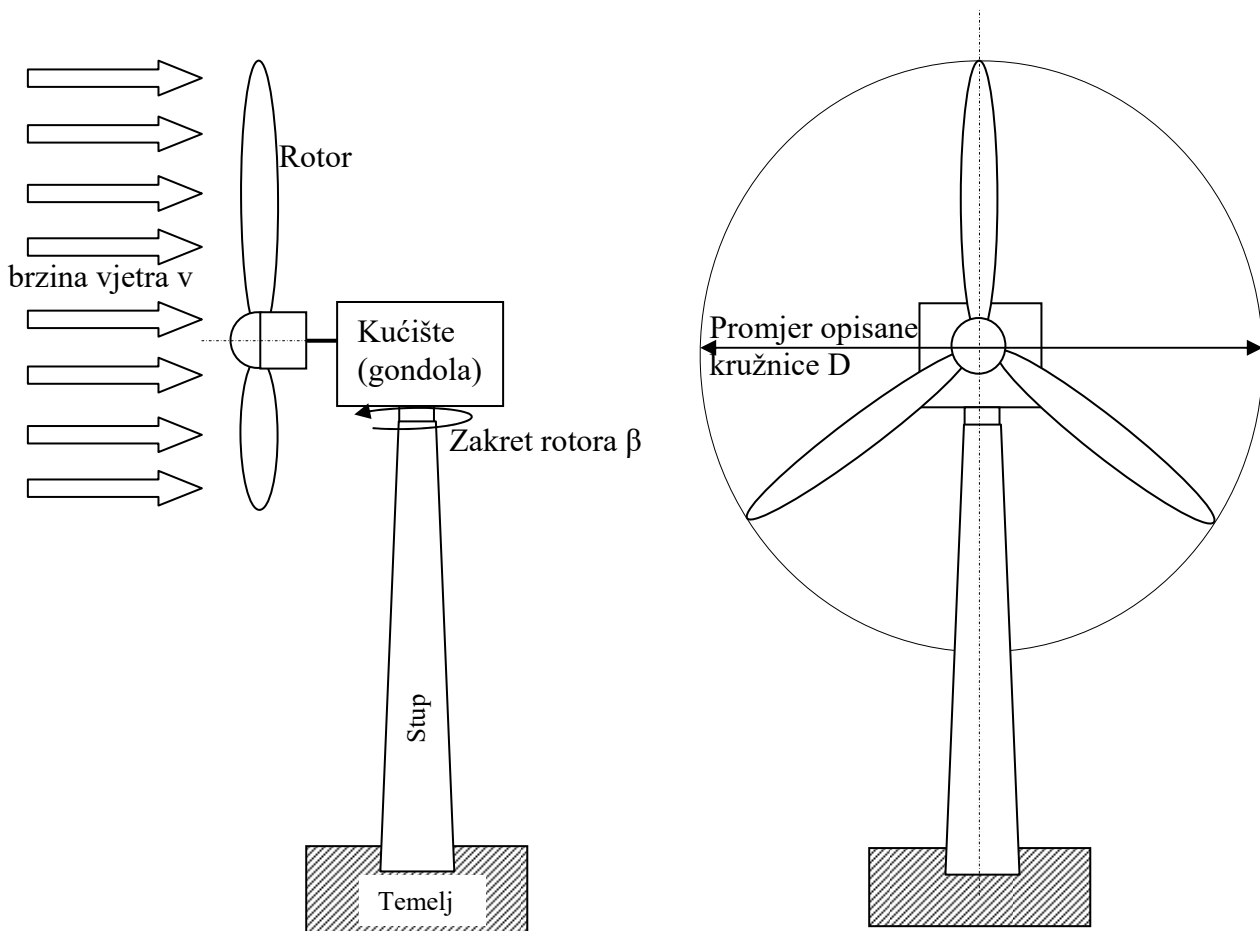
Slika 9. Princip rada i regulacije snage rotora vjetroelektrane

Princip rada odn. način iskorištavanja kinetičke energije vjetra prikazan je slikom 9. Vjetar puše brzinom v i nailazi na lopatice rotora koje predstavljaju krilni profil, a naziv su dobile jer

izvorno taj princip rada pripada avionskom profilu. Princip rada zasniva se na razlici tlakova koja se pojavljuje na pretlačnoj strani profila a to je ona na koju nasmirava zrak (vjetar) i podtlačnoj strani koja se nalazi iza u zavjetrini. Razlika tlakova (pomnožena odgovarajućim površinama kako je opisano) daje razliku sila koja ne kraku oko osi rotacije daje zakretni moment. Tako proizvedeni okretni moment pokreće elektro generator koji proizvodi električnu energiju. Iako je princip funkcioniranja krilnog profila jednostavan u praksi se pojavljuju puno složeniji problemi vezani uz regulaciju snage odnosno okretnog momenta u ovisnosti o brzini vjetra. Povećanjem brzine vjetra povećavaju se i sile na krilni profil uz istovremeno povećanje brzine vrtnje (broja okretaja) rotora. Kako bi se te dvije veličine mogle držati pod kontrolom omogućen je zakret lopatice, na slici prikazano kutom α , oko uzdužne osi lopatice (krilnog profila). time je omogućeno povećanje ili smanjenje površine profila izloženog vjetri pri slabijem odn. jačem vjetru, slično principu jedrenja na moru pri različitim brzinama vjetra. Drugi kut prikazan slikom 9. je kut β koji opisuje zakret cijelog rotora oko vertikalne osi stupa vjetroelektrane jer je nužno omogućiti rotoru nesmetanu rotaciju kako bi zauzeo položaj prema smjeru iz kojeg puše vjetar koji nije uvijek isti.

Osnovni dijelovi vjetroelektrane

Slikom 9. opisan je princip zahvata vjetra i nastanka okretnog momenta dok slika 10. daje pregled osnovnih dijelova vjetroelektrane.



Slika 10. Osnovni dijelovi vjetroelektrane u dva pogleda (nacrtni i bocrt)

Vjetroelektrana ili možemo još reći vjetroagregat ima sljedeće osnovne dijelove:

- temelj koji služi kao veza između podloge i svih ostalih dijelova te mora osigurati stabilnost konstrukcije pri najjačim vjetrovima,
- stup spaja temelj i kućište, šuplje je konstrukcije i služi za komunikaciju između podnožja i kućišta što se ostvaruje ljestvama ili liftom koji se nalazi unutar stupa,
- kućište ili gondola je „srce“ postrojenja jer se tu nalaze vitalni dijelovi za proizvodnju električne energije, od sustava prijenosa mehaničke energije proizvedene rotacijom rotora, generatora električne energije do kompletnih upravljačkih i regulacijskih sustava,
- rotor služi za proizvodnju mehaničke energije u obliku rotacijskog gibanja kao što je opisano uz sliku 9.

Snaga vjetroelektrane

Pretvorba kinetičke energije vjetra u mehanički rad bazirana je na tzv. „primitivnoj teoriji propelera“ dijelu mehanike fluida. Kao rezultat primjene te teorije dolazi se do mehaničke snage proizvedene u rotoru vjetroelektrane P_{meh} :

$$P_{meh} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot c_p \quad (1)$$

gdje su:

$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ - gustoća zraka,

$A = \frac{D^2 \cdot \pi}{4} \left[m^2 \right]$,

$D \left[m \right]$ - promjer opisane kružnice oko vrhova lopatica rotora (slika 10.),

$v \left[\frac{m}{s} \right]$ - brzina vjetra,

$c_p \left[- \right]$ - Betzov faktor.

Potonji koeficijent rezultat je Betzovog zakona koji je dobio ime po Albertu Betzu (1885.-1968.), njemačkom inženjeru brodogradnje koji se bavio mehanikom fluida napose krilnim profilima. Tim je zakonom utvrdio da je moguće maksimalno iskoristiti 16/27 ili 59,3% kinetičke energije vjetra.

Množenjem izraza (1) s mehaničkim stupnjem iskorištenja agregata η_m i električnim stupnjem iskorištenja generatora η_e dobiva se snaga proizvedene električne energije P:

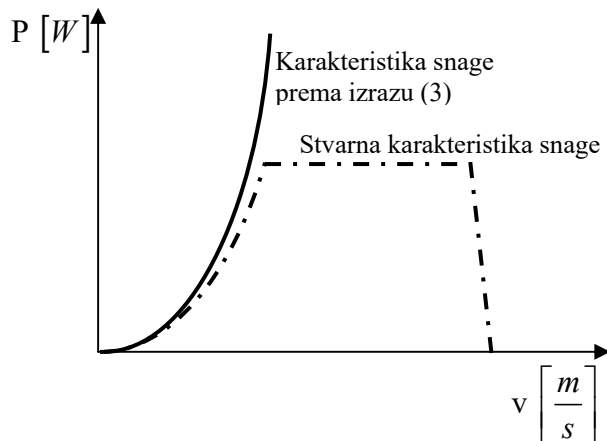
$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot c_p \cdot \eta_m \cdot \eta_g \quad (2)$$

Karakteristika snage vjetroelektrane

U izrazu (2) uočava se ovisnost snage vjetroelektrane o trećoj potenciji brzine v. Ostale veličine, osim gustoće ρ , mogu se smatrati konstantnima jer su rezultat geometrijskih i konstrukcijskih karakteristika vjetroelektrane. Gustoća ρ ovisi o temperaturi zraka pa može znatno utjecati na snagu vjetroelektrane obzirom na velike razlike temperature zraka ljeti i zimi. Uzimajući ovo u obzir, uz činjenicu da je za određenu vrijednost temperature zraka gustoća zraka ρ konstantna vrijednost, izraz (2) se može napisati:

$$P = K \cdot v^3 \quad (3)$$

Izraz je parabola trećeg stupnja koja se je grafički predočena na slici 11. punom linijom.



Slika 11. Grafički prikaz ovisnosti snage o brzini vjetra

To znači da udvostručenje brzine vjetra rezultira povećanjem snage osam puta što bi u praktičnom slučaju dovelo do prevelikih obodnih brzina lopatica, prevelikih momenata i mehaničkih opterećenja. Stoga je potrebno regulacijom zakreta lopatica kako je prethodno opisano regulirati snagu vjetroelektrane kako bi se izbjegle takve situacije. Stvarna karakteristika snage prikazana je također na slici 11. „crta-točka“ linijom.

Do određene brzine vjetra karakteristike se podudaraju, a nakon toga regulacijom se snaga drži konstantnom (horizontalni dio stvarne karakteristike) nakon čega slijedi zaustavljanje rotora (padajući pravac stvarne karakteristike). Konstantna snaga treba biti u što većem rasponu brzina i mora osigurati maksimalno iskorištenje kinetičke energije vjetra, a da pri tome ne dođe ni do kakvih mehaničkih oštećenja. Uobičajeno se vjetroelektrane zaustavljaju pri brzini vjetra od 25m/s.

Brzina vjetra

Da bi se dobilo osjećaj o brzini vjetra dana je tablica 2 u kojoj su navedene različite mjerne jedinice od nama uobičajenih km/h i m/s do onih anglosaksonskih poput čvorova (knots, 1 knot= 1,852 km/h) i mph (miles per hour, 1 mph=1,609 km/h). Čvor se koristi obično u vremenskim prognozama za pomorce, a mph je uobičajena anglosaksonska jedinica za brzinu. U prvom stupcu dana je Beaufortova ljestvica koja je dobila ime po moreplovcu Francisu Beaufortu (1774. – 1857.), Ircu koji je bio u službi Kraljevske ratne mornarice Ujedinjenog Kraljevstva. Definirao je ljestvicu temeljenu na opažanju pojava koju vjetar izaziva na kopnu. pojave na moru opisane u tablici 2. u zadnja dva stupca koji opisuju visinu valova u metrima i stopama (ft, 1f(ee)t=0,3048 m). Ono što je još efekt koji nije naveden, a to je zapjenjenost mora i izgled kresti valova.

Prema onome što je rečeno u prethodnom poglavlju vezano uz karakteristiku rada vjetroelektrane i podatak da one rade do vrijednosti brzine vjetra od maksimalno 25 m/s iz tablice vidljivo je da se radi o vjetru jačine 7Bf.

Tablica 2. Brzina vjetra i i pojave koje vjetar izaziva u prirodi

Bf	Brzina					Visina valova	
		km/h	m/s	kt	mph	m	ft
0 Bf	tišina	< 1	0-0.2	< 1	< 1	-	-
1 Bf	lahor	1-5	0.3-1.5	1-3	1-3	0.1(0.1)	0.25(0.25)
2 Bf	povjetarac	6-11	1.6-3.3	4-6	4-7	0.2(0.3)	0.5(1)
3 Bf	slabi	12-19	3.4-5.4	7-10	8-12	0.6(1)	2(3)
4 Bf	umjereni	20-28	5.5-7.9	11-16	13-18	1(1.5)	3.5(5)
5 Bf	umjereni jaki	29-38	8.0-10.7	17-21	19-24	2(2.5)	6(8.5)
6 Bf	jaki	39-49	10.8-13.8	22-27	25-31	3(4)	9.5(13)
7 Bf	žestoki	50-61	13.9-17.1	28-33	32-38	4(5.5)	13.5(19)
8 Bf	olujni	62-74	17.2-20.7	34-40	39-46	5.5(7.5)	18(25)
9 Bf	jaki olujni	75-88	20.8-24.4	41-47	47-54	7(10)	23(32)
10 Bf	orkanski	89-102	24.5-28.4	48-55	55-63	9(12.5)	29(41)
11 Bf	jaki orkanski	103-117	28.5-32.6	56-63	64-72	11.5(16)	37(52)
12 Bf	orkan	>=118	>=32.7	>=64	>=73	14(-)	45(-)