Potom reče Bog: „Neka budu svetila na svodu nebeskom,
da dele dan i noć, da budu znaci vremenima i danima i godinama,“
(Postanak 1,14)

PREDGOVOR

Solarna energetika se u okviru predmeta Obnovljivi izvori energije na Elektrotehničkom fakultetu u Banjoj Luci izučava od 2008. godine. Profesor Nikola Rajaković, gostujući profesor sa beogradskog Elektrotehničkog fakulteta i prvi šef Katedre za elektroenergetiku u Banjoj Luci, vizionarski je insistirao da se nastavni plan obogati ovim predmetom, smatrajući da smo na pragu svijetle budućnosti primjene solarnih sistema. Moram da priznam da sam u početku bio veoma skeptičan u pogledu takvog poteza, cijeneći da fotonaponski sistemi sa znatno višim investicionim troškovima po kilovatu instalisane snage, ne mogu da budu konkurencija drugim tehnologijama za proizvodnju električne energije. Iako sumnjičav, vrijedno sam se prihvatio posla i kontinuirano gradio zadatke za vježbe, koristeći se u potpunosti stranom literaturom. Iz dana u dan, shvatao sam da je profesor Rajaković itekako bio u pravu, posmatrajući kako cijena fotonaponskih sistema opada, a njihova instalisana snaga u svijetu vrtoglavo raste. Sa razvojem solarne tehnologije, stasavao je i naš predmet. Nastavni materijali su svake godine bili sve bogatiji. Asistent na predmetu Obnovljivi izvori energije bio sam do 2014. godine, kada sam biran u zvanje nastavnika. Od nastavnih materijala na predavanjima koristio sam dijelove knjiga različitih autora, na srpskom i na engleskom jeziku, video prezentacije i internet resurse. Nije bilo teško zaključiti da je studentima neophodan sveobuhvatan udžbenik koji bi u potpunosti pratio program predmeta iz oblasti solarne energetike. Odlučio sam da skromno znanje koje sam stekao do sada, pretočim u knjigu, nadajući se da će biti na korist studentima tehničkih fakulteta i inženjerima koji se u praksi bave solarnim sistemima. Svjestan da knjiga može da bude poboljšana, primjedbe i sugestije dobronamjernih čitalaca primiću sa zahvalnošću.

Knjiga je organizovana u sedam poglavlja. U prvom poglavlju dat je kratak uvod u problematiku solarne energetike, sa aktuelnim trendovima razvoja i motivaciji za njeno detaljnije izučavanje. Drugo poglavlje je posvećeno procesima generisanja energije na Suncu, zračenju u okolni prostor i uticaju atmosfere na dospijevanje Sunčevog zračenja na površinu Zemlje. Tema trećeg poglavlja je međusobni položaj Sunca i Zemlje, odnosno pozicija Sunčevog diska na nebeskom svodu, gledano iz perspektive posmatrača sa Zemlje. U četvrtom poglavlju predstavljeni su matematički modeli za određivanje direktne, difuzne i reflektovane komponente zračenja koje dospijevaju na solarni kolektor proizvoljne orijentacije. U petom poglavlju govori se o fotonaponskoj konverziji, kao direktnom načinu za pretvaranje

energije zračenja Sunca u električnu energiju. Tema šestog poglavlja su fotonaponski sistemi, koji su formirani kao veza fotonaponskih modula sa elektronskim pretvaračima i uređajima za skladištenje energije. Sedmo poglavlje je posvećeno ekonomskim i regulatornim aspektima solarne energetike. U dodacima datim na kraju knjige, u formi dijagrama i tabela, sistematično su prikazani razni klimatski i energetski pokazatelji koji su neophodni za procjenu proizvodnje solarnih sistema. Takođe su opisana i dva softvera dostupna na internetu, koje čitaoci mogu da koriste pri analizi performansi fotonaponskih sistema.

Namjera mi je bila da se ova knjiga ne koristi samo na Elektrotehničkom fakultetu u Banjoj Luci, nego i na drugim fakultetima elektrotehnike u regionu. Iz tog razloga ilustrativni primjeri, te meteorološki i energetski podaci prikazani su za dvanaest gradova u okruženju u kojima egzistiraju elektrotehnički fakulteti.

Želim da se zahvalim članovima Katedre za elektroenergetiku, na čelu sa profesorom Petrom Matićem, koji su mi nesebično pružali podršku i oslobađali me raznih dužnosti na fakultetu, u namjeri da ova knjiga što prije ugleda svjetlost dana. Posebnu zahvalnost dugujem asistentu Predragu Mršiću, koji je sa mnom bistrio mnoge probleme i nejasnoće tokom razvoja predmeta Obnovljivi izvori energije, a na kraju i detaljno pročitao rukopis knjige, te iznio niz korisnih sugestija. Značajan broj nedostataka otklonjen je i zahvaljujući asistentu Bojanu Ercegu, koji je takođe pročitao rukopis u cjelosti.

Najtoplije se zahvaljujem recenzentima, cijenjenim profesorima Vladimiru Katiću sa Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu i Željku Đurišiću sa Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, na pažljivom iščitavanju rukopisa knjige i veoma pozitivnim kritikama.

Profesoru Nikoli Rajakoviću, začetniku predmeta Obnovljivi izvori energije i jednom od rodonačelnika studija elektroenergetike u Banjoj Luci, posvećujem ovu knjigu.

U Banjoj Luci, septembra 2018. godine

Čedomir Zeljković



SADRŽAJ

1 UVOD 1

1.1 AKTUELNI TRENDOVI RAZVOJA SOLARNE ENERGETIKE U SVIJETU 1

1.2 OSNOVNI MOTIVI ZA IZUČAVANJE SOLARNE ENERGETIKE 3

1.2.1 Neiscrpan energetski resurs 4

1.2.2 Ekološka prihvatljivost 4

1.2.3 Povoljni klimatski uslovi u našem regionu 5

1.2.4 Kontinuirani razvoj tehnologije i pad cijena 7

1.2.5 Razvoj lokalne ekonomije i jačanje energetske nezavisnosti 9

2 SUNCE KAO IZVOR ENERGIJE 11

2.1 OSNOVNE KARAKTERISTIKE SUNCA 11

2.1.1 Nuklearna reakcija na Suncu 12

2.2 PROCES ZRAČENJA ENERGIJE U SVEMIR 17

2.2.1 Osnovni pojmovi i definicije 17

2.2.2 Fizički zakoni zračenja 22

2.2.3 Specifičnosti zračenja Sunca 27

2.3 DOSPIJEVANJE SUNČEVE ENERGIJE NA ZEMLJU 30

2.3.1 Struktura atmosfere 30

2.3.2 Integralni energetski bilans atmosfere 31

2.3.3 Apsorpcija zračenja u atmosferi 34

2.3.4 Rasijanje zračenja u atmosferi 36

2.3.5 Pojam vazdušne mase 37

2.3.6 Snaga i spektar zračenja na Zemljinom tlu 39

3 POLOŽAJ SUNCA NA NEBESKOJ SFERI 43

3.1 OZNAČAVANJE POZICIJA NA ZEMLJI 44

3.2 ZEMLJINA ELIPTIČNA PUTANJA OKO SUNCA 46

3.3 GEOCENTRIČNA REPREZENTACIJA POLOŽAJA ZEMLJE I SUNCA 49

3.4 SOLARNO VRIJEME 52

3.4.1 Definicija solarnog vremena 52

3.4.2 Satni ugao 54

3.4.3 Veza solarnog i standardnog lokalnog vremena 55

3.5 UGLOVI KOJI ODREĐUJU POZICIJU SUNCA 60

3.5.1 Elevacioni ugao Sunca u solarno podne 60

3.5.2 Pozicija Sunca u proizvoljno doba dana ... 62
3.5.3 Vremena izlaska i zalaska Sunca ... 64
3.6 DIJAGRAMSKI PRIKAZ PROMJENE POZICIJE SUNCA ... 66
3.6.1 Sjenke koje potiču od susjednih objekata ... 68
4 ZRAČENJE NA SOLARNI KOLEKTOR ... 75
4.1 ZRAČENJE IZVAN ATMOSFERE ... 77
4.2 RAČUNANJE IRADIJANSE KOLEKTORA TOKOM VEDRIH DANA ... 81
4.2.1 Direktna komponenta zračenja ... 81
4.2.2 Difuzna komponenta zračenja ... 86
4.2.3 Reflektovana komponenta zračenja ... 95
4.2.4 Ukupno zračenje na kolektor fiksne orijentacije ... 98
4.2.5 Sistemi za praćenje pozicije Sunca ... 99
4.3 RAČUNANJE INSOLACIJE KOLEKTORA TOKOM VEDRIH DANA ... 105
4.4 IRADIJANSA I INSOLACIJA UZ UVAŽAVANJE OBLAČNOSTI ... 110
4.4.1 Definicija indeksa vedrine ... 112
4.4.2 Veza indeksa vedrine i difuzne komponente insolacije ... 115
4.4.3 Određivanje insolacije na kolektoru proizvoljne orijentacije ... 118
4.4.4 Optimalni nagib kolektora u prisustvu oblačnosti ... 122
4.5 MJERENJE I STATISTIČKA OBILJEŽJA SUNČEVOG ZRAČENJA ... 123
4.5.1 Uređaji za mjerenje ... 123
4.5.2 Mape potencijala Sunčevog zračenja ... 128
4.5.3 Tipična meteorološka godina ... 129
4.5.4 Vještačko generisanje podataka o Sunčevom zračenju ... 131
5 FOTONAPONSKA KONVERZIJA ... 133
5.1 ISTORIJSKI RAZVOJ FOTONAPONSKE TEHNOLOGIJE ... 133
5.2 OSNOVE FIZIKE POLUPROVODNIKA ... 136
5.2.1 Energetski nivoi i zone ... 136
5.2.2 Poluprovodnički materijali ... 138
5.2.3 Fotonaponski efekat ... 139
5.2.4 Dopiranje ... 144
5.2.5 P-N spoj ... 146
5.3 FOTONAPONSKA ĆELIJA ... 149
5.3.1 Osnovni model fotonaponske ćelije ... 151
5.3.2 Detaljniji modeli fotonaponske ćelije ... 156
5.3.3 Model sa dvije diode ... 157
5.4 FOTONAPONSKI MODULI I PANELI ... 158
5.4.1 Fotonaponski moduli ... 158

5.4.2 Fotonaponski paneli ... 160
5.5 UTICAJ IRADIJANSE I TEMPERATURE NA KARAKTERISTIKU PV MODULA 162
5.5.1 I-U karakteristika modula pri standardnim uslovima ... 162
5.5.2 Uticaj iradijanse na I-U karakteristiku modula ... 164
5.5.3 Uticaj temperature na I-U karakteristiku modula ... 164
5.6 NEGATIVNI UTICAJ SJENČENJA ... 167
5.6.1 Modelovanje efekta sjenčenja ... 167
5.6.2 Premošćavajuće diode ... 170
5.6.3 Blokirajuće diode ... 172
6 FOTONAPONSKI SISTEMI ... 175
6.1 TIPOVI FOTONAPONSKIH SISTEMA ... 175
6.1.1 Samostalni fotonaponski sistemi ... 176
6.1.2 Hibridni fotonaponski sistemi ... 178
6.1.3 Fotonaponski sistemi povezani sa mrežom ... 179
6.1.4 Fotonaponski sistemi integrisani u zgrade ... 182
6.2 BATERIJE ... 183
6.2.1 Olovne baterije ... 183
6.2.2 Baterije na bazi nikla ... 187
6.2.3 Baterije na bazi litijuma ... 188
6.2.4 Osnovni tehnički pokazatelji baterija ... 189
6.3 DC/DC PRETVARAČI ... 195
6.3.1 Osnovne topologije DC/DC pretvarača ... 196
6.3.2 Algoritmi za traženje tačke maksimalne snage (MPPT) ... 201
6.4 INVERTORI ... 206
6.4.1 Osnovne topologije invertora ... 206
6.4.2 Osnovni tehnički pokazatelji invertora ... 213
6.4.3 Invertorske konfiguracije kod mrežno povezanih sistema ... 215
6.5 PRATEĆE KOMPONENTE FOTONAPONSKOG SISTEMA ... 220
6.5.1 Zaštitna i sklopna oprema ... 222
6.5.2 Ožičenje ... 229
6.5.3 Elementi za montažu ... 233
6.5.4 Nadzor i upravljanje ... 235
7 EKONOMSKA ANALIZA ... 239
7.1 OSNOVNI POJMOVI INŽENJERSKE EKONOMIJE ... 239
7.1.1 Investitori i dobit ... 240
7.1.2 Prosti period otplate ... 240
7.1.3 Prosta stopa prinosa ... 241
7.1.4 Analiza tokova novca (Cash Flow) ... 242

7.1.5 Diskontovani tokova novca (Discounted Cash Flow) 243
7.1.6 Neto sadašnja vrijednost 244
7.1.7 Uticaj inflacije 246
7.1.8 Interna stopa prinosa 247
7.1.9 Svođenje investicije na godišnji nivo 248
7.1.10 Nivelisana cijena energije 252
7.2 OCJENA INVESTIRANJA U FOTONAPONSKI SISTEM 253
7.2.1 Određivanje troškova PV sistema 254
7.2.2 Određivanje proizvedene energije 257
7.2.3 Cijena energije iz mrežno povezanog PV sistema 259
7.2.4 Podsticajni mehanizmi 261
7.2.5 Sistem podsticaja za obnovljive izvore u Republici Srpskoj 263
7.2.6 Cijena energije iz samostalnog PV sistema 267
LITERATURA 271
DODATAK A: DIJAGRAMI PUTANJE SUNCA 275
DODATAK B: METEOROLOŠKI I ENERGETSKI PODACI 279
DODATAK C: DOSTUPNI SOFTVERSKI ALATI 285
INDEKS 287

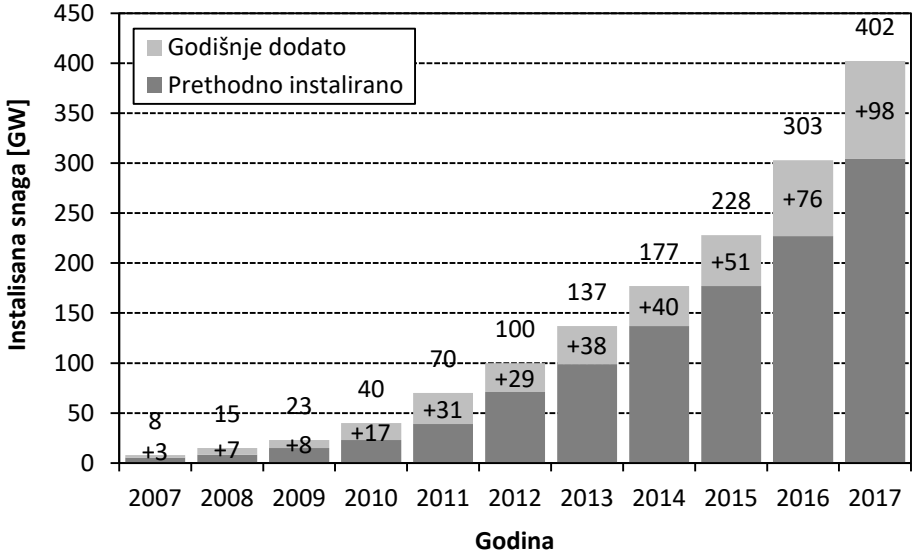
1 UVOD

Tokom posljednjih desetak godina solarna energija se kristališe kao respektabilan segment u globalnom energetskom miksu. U fotonaponskoj tehnologiji instalisana snaga u svijetu do kraja 2017. godine dostigla je cifru od 402 GW, što predstavlja mnogostruko povećanje u odnosu na vrijednost od 8 GW, koja je zabilježena deset godina ranije. Vrtoglavi napredak je posljedica spleta uticajnih faktora među kojima se posebno ističu: jačanje ekološke svijesti u svijetu i traženje alternative fosilnim gorivima, donošenje političkih odluka i formiranje mehanizama podrške za korišćenje obnovljivih izvora energije, te smanjenje cijena i povećanje efikasnosti fotonaponskih modula i pripadajuće elektronske opreme.

1.1 Aktuelni trendovi razvoja solarne energetike u svijetu

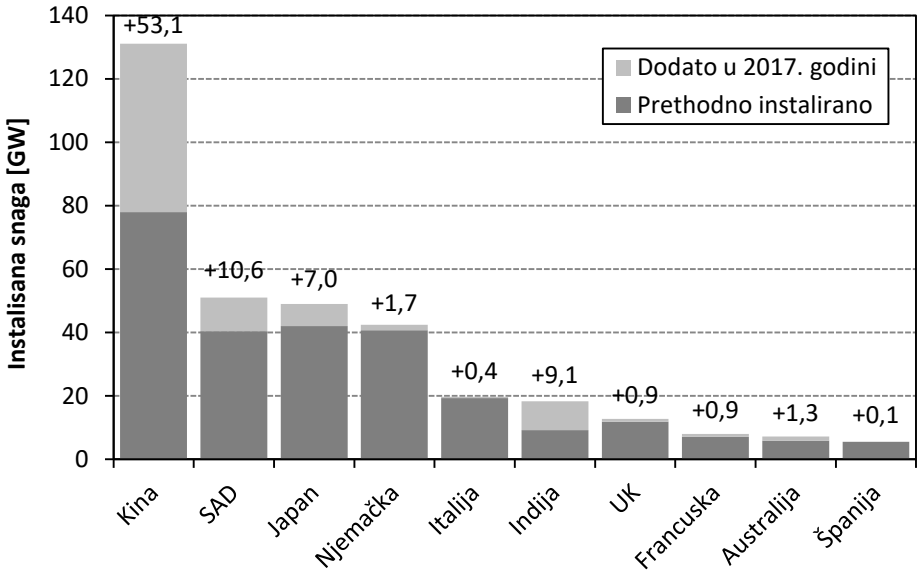
Instalisana snaga obnovljivih izvora energije u svijetu kontinuirano raste, a tokom 2017. godine ostvareno je dosad najveće godišnje povećanje od oko 178 GW. U okviru navedenog inkrementa sami solarni fotonaponski sistemi doprinijeli su sa 55%. Tokom 2017. godine više je izgrađeno fotonaponskih kapaciteta nego što je ukupna snaga svih novih elektrana baziranih na sagorijevanju fosilnih goriva i nuklearnoj energiji. Dijagram trenda ekspanzije ove tehnologije na svjetskom nivou prikazan je na slici 1.1. Primjetno je da već neko vrijeme godišnja stopa rasta instalisane snage fotonaponskih sistema iznosi oko jednu trećinu. Glavni nosioci razvoja su azijske zemlje, među kojima se posebno ističe Kina. Kina je svjetski lider kako po apsolutnom instalisanom kapacitetu, tako i po snazi dodatoj tokom 2017. godine.

Poređenje deset najuspješnijih zemalja prikazano je na slici 1.2. Ubjedljivo na čelu je Kina, koja je dodajući 53,1 GW tokom 2017. godine dostigla rekordnu cifru od 131,1 GW. U narednoj kategoriji su SAD (51 GW), Japan (49 GW) i Njemačka (42,4 GW), dok su u trećoj grupi Italija (19,7 GW) i Indija (18,3 GW). Iako je većina instalisane snage koncentrisana u malom broju država, na svakom kontinentu je izgrađeno bar po 1 GW, a na kraju 2017. godine kapacitet od 1 GW nadmašen je u čak 29 država.



SLIKA 1.1

Rast instalisane snage fotonaponskih sistema u svijetu tokom posljednje dekade



SLIKA 1.2

Svjetski lideri u fotonaponskoj tehnologiji

Razvoj obnovljivih izvora energije rezultat je složenog lanca uzročno-posljedičnih akcija koje se prenose od državnog zakonodavstva sve do krajnjeg korisnika. Na početku lanca je država koja identifikuje da postoje problemi kao što su rast potreba za energijom, iscrpljivanje zaliha fosilnih goriva, povećanje stepena zagađenja atmosfere i sve primjetnije klimatske promjene. Prve značajnije koordinisane aktivnosti većeg broja svjetskih država pokrenute su 1992. godine međunarodnom konvencijom o klimatskim promjenama pod okriljem Organizacije ujedinjenih nacija (*United Nations Framework Convention on Climate Change* − UNFCCC). Tada je definisan osnovni cilj da je emisiju gasova staklene bašte neophodno stabilizovati na nivo koji garantuje sprečavanje opasnih klimatskih promjena antropogenog karaktera. Izvorna ideja je dalje razvijana na redovnim godišnjim konferencijama, među kojima se posebno ističu one održane u Kjotu (1997), Kopenhagenu (2009) i Parizu (2015), pošto su rezultovale potpisivanjem zvaničnih dokumenata. Prema sporazumu iz Pariza, države potpisnice su se obavezale da će se posvetiti zadatku da se globalni rast temperature zadrži značajno ispod 2°C u odnosu na predindustrijsko doba. Obaveza svake države je pravljenje plana i redovno izvještavanje o preduzetim akcijama i ostvarenim doprinosima na polju smanjenja globalnog zagrijavanja. Da bi država uspjela da ostvari zacrtane ciljeve neophodno je da motiviše sve uticajne subjekte od proizvođača do potrošača energije. Najuspješniji motivacioni mehanizmi su zasnovani na kombinaciji regulatornih mjera kojima se definišu potrebne kvote (obaveze) i ekonomskih instrumenata kojima se obezbjeđuju finansijski podsticaji. Regulatorni okvir pomaže da se obaveze koje je preuzela država potpisujući međunarodni sporazum što bolje preslikaju na proizvođače i potrošače električne energije, uz neizbježno postojanje mehanizama za praćenje procesa i kažnjavanje učesnika koji se ne pridržavaju propisanog puta. Finansijski instrumenti podrške proizvođačima energije iz obnovljivih izvora moraju kontinuirano da se prilagođavaju uslovima na tržištu i padu investicionih troškova, tako da što bolje oslikavaju realnu cijenu energije.

1.2 Osnovni motivi za izučavanje solarne energetike

Progres obnovljivih izvora energije je evidentan, a takođe i činjenica da se od svih tehnologija solarna energetika u aktuelnom trenutku razvija najintenzivnije. Možemo da izdvojimo nekoliko snažnih motiva koji govore u prilog da itekako ima smisla izučavati solarnu energetiku.

1.2.1 Neiscrpan energetski resurs

Sunce predstavlja impozantan, praktično neiscrpan izvor energije. Ova Zemlji najbliža zvijezda nalazi se na polovini svog životnog vijeka, koji se procjenjuje na oko 10 milijardi godina. Proces emitovanja energije veoma je stabilan. Energija koja dospije na Zemlju je teorijski dovoljna da višestruko pokrije sve potrebe čovječanstva. Sunčeva energija je indirekno pokretač i za ostale energetske izvore na Zemlji kao što su energija vjetra, hidroenergija, energija fosilnih goriva itd. Ukupna snaga zračenja Sunca iznosi oko $3{,}8\times10^{20}$ MW. Poređenja radi, prosječna snaga svih elektrana na svijetu je reda veličine 3×10^{6} MW. Elektrane locirane u Republici Srpskoj proizvedu tipično oko 7 TWh godišnje, što dijeljenjem sa 8760 časova koliko ima godina, daje prosječnu snagu oko 800 MW. Sistematično poređenje snage zračenja Sunca sa karakterističnim vrijednostima snage na Zemlji prikazano je u tabeli 1.1.

TABELA 1.1

Poređenje snage Sunca sa drugim reprezentativnim energetskim pokazateljima

Pokazatelj	Prosječna snaga [MW]
Snaga Sunca na njegovoj površini	$3{,}8\times10^{20}$
Snaga Sunca koja dospijeva na Zemlju	1×10^{11}
Ukupna snaga potrošnje na Zemlji u svim vidovima	2×10^{7}
Ukupna snaga potrošnje električne energije na svijetu	3×10^{6}
Prosječna snaga svih elektrana u Republici Srpskoj	800

1.2.2 Ekološka prihvatljivost

Globalno zagrijavanje i klimatske promjene postaju sve očigledniji iz godine u godinu. Temperaturni rekordi, ekstremne meteorološke pojave od dugotrajnih suša do enormnih količina padavina, topljenje leda u polarnim oblastima i povećanje nivoa svjetskog mora dokazi su sa kojima se svakodnevno suočavamo. Jedan od osnovnih uzroka globalnog zagrijavanja predstavlja povećanje koncentracije tzv. gasova staklene bašte od kojih su najznačajniji vodena para i ugljen-dioksid (CO_2). Gasovi staklene bašte koji se nalaze u atmosferi apsorbuju jedan dio energije koju bi Zemlja inače izračila u svemir, te je reflektuju nazad ka tlu u vidu infracrvenog zračenja. Koncentracija gasa CO_2 ubrzano raste i tokom 2018. godine dostigla je rekordnih 410 ppm, što je za oko 45% više u odnosu na stanje pred

početak industrijske revolucije. Aktuelna strategija dogovorena na internacionalnom nivou i potvrđena Pariskim sporazumom iz decembra 2015. godine je da se rast temperature pokuša da ograniči na maksimalno 2°C u odnosu na predindustrijsko doba. Prema proračunima to otprilike znači da, u poređenju sa nivoom iz devedesetih godina prošlog vijeka, emisija CO_2 gasa do 2050. godine mora biti smanjena za oko 50%, a do 2100. godine praktično svedena na nulu.

Korišćenje fotonaponskih sistema za proizvodnju električne energije umjesto tradicionalnih parnih ili gasnih termoelektrana dovodi do višestrukog smanjenja emisije ugljen-dioksida. Iako fotonaponski sistemi tokom eksploatacije ne emituju ni malo gasa CO_2 u atmosferu, određena emisija se događa za vrijeme procesa proizvodnje fotonaponskih modula. Ekvivalentni stepen emisije, koji je određen na nivou cijelog životnog vijeka, za fotonaponske sisteme bazirane na modulima od kristalnog silicijuma iznosi reda 30−50 g/kWh. Navedeni stepen je desetak puta manji od emisije gasa CO_2 u gasnim termoelektranama i preko dvadeset puta manji od emisije koja se javlja u termoelektranama na niskokalorični ugalj. Fotonaponske elektrane ipak nisu izvori sa apsolutno najmanjom emisijom, što potvrđuje činjenica da je kod hidroelektrana i vjetroelektrana stepen emisije moguće spustiti čak i ispod 10 g/kWh.

Uz nizak nivo emisije gasova staklene bašte, fotonaponski sistemi imaju i druge povoljne ekološke karakteristike. Kako kod ove tehnologije za proizvodnju energije ne postoje obrtni dijelovi, ne javljaju se buka i vibracije. Fotonaponski moduli mogu biti postavljeni kao dio krova ili fasade zgrade, ne zauzimajući dodatni prostor, a stvarajući povoljan estetski i funkcionalni efekat. Mora se priznati da je za elektrane najvećih snaga, kod kojih su fotonaponski moduli postavljeni na tlu, neophodna prilično velika površina za montažu.

1.2.3 Povoljni klimatski uslovi u našem regionu

Među motivacionim faktorima za bavljenje fotonaponskom tehnologijom posebno je važno što su zemlje Balkana pozicionirane na povoljnom geografskom položaju. Njemačka kao evropski lider u fotonaponskoj tehnologiji, sa ukupnom instalisanom snagom od preko 42 GW, postigla je izvanredne rezultate, uprkos skromnoj vrijednosti prosječne insolacije na horizontalnu podlogu od svega 1055 kWh/m^2. Poređenja radi, Banja Luka na kvadratni metar horizontalne površine godišnje dobija oko 1270 kWh energije Sunčevog zračenja, a pojedine lokacije u Hercegovini i preko 1500 kWh. I države u okruženju raspolažu solarnim potencijalom koji je na uporedivom nivou.

Za sticanje boljeg uvida u raspodjelu solarnog potencijala u zavisnosti od geografskog položaja, korisne su naredna slika i tabela. Na slici 1.3 prikazana je