

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I  
BRODOGRADNJE**

**POSLIJEDIPLOMSKI DOKTORSKI STUDIJ  
ELEKTROTEHNIKE I INFORMACIJSKE TEHNOLOGIJE**

**KVALIFIKACIJSKI ISPIT**

**MODELIRANJE UTJECAJA SPEKTRA  
SUNČEVOG ZRAČENJA NA EFIKASNOST  
FOTONAPONSKIH ĆELIJA**

Ivan Bevanda

Split, siječnja 2025.

# Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. SPEKTAR SUNČEVOG ZRAČENJA I FN TEHNOLOGIJE .....	3
2.1. Karakteristike spektra Sunčevog zračenja .....	3
2.2. FN tehnologije .....	5
2.3. Standardi za analizu performansi FN ćelija .....	8
2.4. Standardni AM 1.5 spektar .....	10
2.5. Spektralni odziv FN ćelija .....	12
3. UTJECAJ SPEKTRA SUNČEVOG ZRAČENJA NA UČINKOVITOST FN ĆELIJE .....	14
3.1. Razlozi zanemarivanja spektra Sunčevog zračenja .....	14
3.2. Okolišne varijable koje utječu na spektar .....	14
3.3. Početci razmatranja utjecaja Sunčevog spektra na performanse FN ćelije.....	18
3.4. Matematičko opisivanje spektra Sunčevog zračenja .....	19
3.4.1 Masa zraka.....	20
3.4.2 Indeks prozirnosti.....	22
3.4.3 Omjer difuznog Sunčevog zračenja.....	23
3.4.4 Atmosferska taložna voda .....	24
3.4.5 Optička dubina aerosola.....	26
3.4.6 Prosječna energija fotona.....	27
3.4.7 Apsorpcijski pojas .....	28
3.5. Opisivanje promjena performansi FN sustava uzrokovanih spektrom .....	29
3.5.1 (Težinski) korisni udio .....	30
3.5.2 Normalizirana struja kratkog spoja .....	31
3.5.3 Faktor neusklađenosti spektra.....	32
4. FUNKCIJE SPEKTRALNE KOREKCIJE .....	34
4.1. AM funkcija .....	34
4.2. $W$ i $AM-W$ funkcije.....	35
4.3. Funkcije koje su kombinacije $AM$ i drugih faktora .....	36
4.4. $APE$ i $APE-\epsilon$ funkcije .....	38
5. ZAKLJUČAK.....	40
POPIS KRATICA.....	42
LITERATURA .....	44

## 1. UVOD

Obnovljivi izvori energije (OIE) postaju sve važniji u globalnoj potrazi za održivom i ekološki prihvatljivom proizvodnjom energije. Dok se svijet suočava s izazovima klimatskih promjena i potrebom za smanjenjem emisija stakleničkih plinova, integracija OIE u nacionalne elektroenergetske mreže dobila je značajan zamah. Među ovim čistim energetske alternativama, fotonaponski (FN) sustavi pojavili su se kao posebno obećavajuća tehnologija, nudeći prilagodljiva i učinkovita rješenja za razne primjene.

FN sustave karakterizira ekološka prihvatljivost, ekonomska isplativost i tehnička fleksibilnost. Ekološki, ne emitiraju stakleničke plinove tijekom rada i predstavljaju obnovljiv izvor energije, doprinoseći smanjenju karbonskog otiska i održivom razvoju. Ekonomski, tehnološki napredak je smanjio troškove instalacije i održavanja, omogućujući dugoročne uštede na računima za električnu energiju, posebno u područjima s velikim brojem sunčanih dana. Tehnički, ovi sustavi su prilagodljivi različitim energetske potrebama, od pojedinačnih kućanstava do velikih industrijskih kompleksa. Integracija s pametnim mrežama i sustavima za pohranu energije dodatno povećava njihovu učinkovitost i pouzdanost, pridonoseći stabilnosti elektroenergetskog sustava (EES). Unatoč navedenim prednostima, FN sustavi imaju određena ograničenja. Njihova učinkovitost je relativno niska i ovisi o vremenskim uvjetima i lokaciji, što utječe na stabilnost proizvodnje energije. Daljnje istraživanje i razvoj su iznimno važni za poboljšanje performansi i pouzdanosti ovih sustava, naročito u području njihovog modeliranja i simulacije.

Sve sofisticiraniji programski alati za modeliranje i simulaciju prate u stopu razvoj FN tehnologija omogućujući preciznije predviđanje performansi FN sustava u raznolikim radnim uvjetima, što otvara nove horizonte u optimizaciji i unaprjeđenju solarne energetike. Precizno modeliranje postaje neophodno za maksimiziranje energetske proizvodnje i efikasnosti, pružajući detaljne uvide u očekivanu proizvodnju u različitim scenarijima. Stvarajući uvjete za proaktivno planiranje održavanja, ovi alati osiguravaju dugoročnu pouzdanost i optimalnu funkcionalnost FN sustava. Štoviše, napredne simulacije potiču inovacije, ubrzavajući razvoj novih FN tehnologija i materijala. Međutim, točnost tih simulacija uvelike ovisi o uključivanju svih relevantnih parametara koji utječu na rad FN ćelija kao što su temperatura, ozračenje i spektar Sunčevog zračenja. Dok su temperatura i ozračenje mjereni na brojnim lokacijama od samih početaka primjene FN sustava, spektar Sunčevog zračenja ostao je relativno zanemaren,

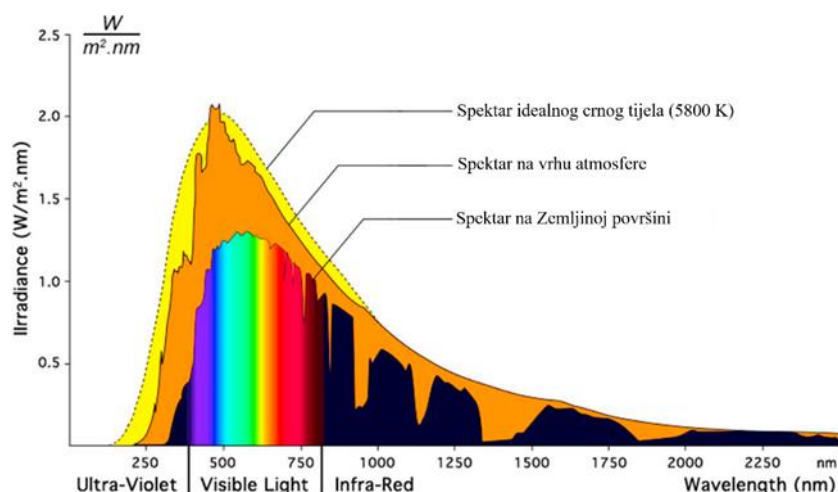
s mjerenjima provedenim tek na malom broju lokacija. Međunarodni standard koji se trenutno primjenjuje za testiranje FN ćelija propisuje standardne testne uvjete (engl. *standard test conditions - STC*) koji obuhvaćaju četiri različite temperature ćelija, sedam različitih razina ozračenja i samo jedan spektar. Jedan dio razloga leži u skupoj opremi za mjerenje spektra Sunčevog zračenja, a drugi u pretpostavci da njegov utjecaj na silicij, koji je najčešće korišten materijal u industriji Sunčeve energije, može biti zanemaren. Ova pretpostavka proizlazi iz činjenice da je silicij relativno dobro prilagođen za apsorpciju širokog spektra Sunčevog zračenja, te se stoga promjene u spektralnoj distribuciji Sunčevog zračenja ne smatraju bitnim za njegovu učinkovitost. Zbog svega navedenog spektar Sunčevog zračenja u većini simulacijskih alata trenutno nije uopće uključen ili je njegov utjecaj na rad FN ćelija predstavljen samo korištenjem pojednostavljenih modela. To može dovesti do značajnih pogrešaka u predviđanju performansi FN sustava, posebno u uvjetima koji odstupaju od STC. Međutim, s razvojem novih materijala i tehnologija, te s povećanim interesom za optimizaciju učinkovitosti FN sustava, sve se više prepoznaje važnost detaljnog razumijevanja, mjerenja i uključivanja spektra Sunčevog zračenja u simulacijske alate.

U ovom radu predstavljen je sveobuhvatan pregled dosadašnjih istraživanja utjecaja spektra Sunčevog zračenja na učinkovitost FN ćelija. Analizirane su različite metode za modeliranje utjecaja spektra Sunčevog zračenja na performanse FN sustava. U uvodnom dijelu objašnjena je važnost točnog predviđanja performansi FN sustava i istaknut značajan utjecaj Sunčevog spektra. U drugom poglavlju opisan je utjecaj spektra na učinkovitost FN ćelija na fundamentalnoj razini. U trećem poglavlju predstavljene su neke zamjenske (engl. *proxy*) varijable, kao i one izvedene neposredno iz spektralnih mjerenja, koje omogućuju preciznu karakterizaciju spektra Sunčevog zračenja. Nakon toga su analizirane metode za karakterizaciju varijacija u performansama FN ćelija uzrokovanih spektralnim promjenama. U četvrtom poglavlju predstavljeno je i uspoređeno nekoliko najčešće korištenih funkcija spektralne korekcije (engl. *spectral correction function - SCF*) koje se koriste u modeliranju performansi FN sustava te su kritički analizirane prednosti i nedostaci svake metode. U zaključnom dijelu predlažu se smjernice za buduća istraživanja, uključujući potrebu za standardiziranom usporedbom različitih metoda i daljnji razvoj modela temeljenih na parametrima izvedenim direktno iz spektralnih mjerenja.

## 2. SPEKTAR SUNČEVOG ZRAČENJA I FN TEHNOLOGIJE

### 2.1. Karakteristike spektra Sunčevog zračenja

Sunce, izvor života i energije na našem planetu, fascinantno je nebesko tijelo koje neprestano proizvodi ogromne količine energije nuklearnom fuzijom vodikovih jezgri [1]. Oslobođena energija putuje kroz slojeve Sunca prema njegovoj površini, gdje se emitira u svemir u obliku elektromagnetskog zračenja. Ovo zračenje, koje se sastoji od čestica zvanih fotoni, širi se svemirom u obliku elektromagnetskih valova. Sunce se u mnogim aspektima ponaša slično idealnom crnom tijelu, emitirajući zračenje u širokom spektru valnih duljina s maksimumom intenziteta koji odgovara njegovoj površinskoj temperaturi od oko 5800 K što se može vidjeti na slici 2.1. Crno tijelo je teorijski koncept u fizici koji opisuje idealni objekt koji apsorbira svo elektromagnetsko zračenje koje pada na njega, bez refleksije, i emitira zračenje savršeno u skladu s Planckovim zakonom zračenja.



*Slika 2.1. Teorijski spektar crnog tijela i potpuni Sunčev spektar na Zemljinoj površini i na vrhu atmosfere [2]*

Sunce emitira zračenje u većem dijelu spektra, a energija koja dolazi do Zemlje poznata je kao Sunčevo zračenje. Dva krajnja dijela Sunčevog spektra su ultraljubičasto (UV) zračenje, koje ima kraće valne duljine od ljubičaste svjetlosti, i infracrveno (IR) zračenje, koje ima dulje valne duljine od crvene svjetlosti. Otprilike 44% Sunčevog zračenja spada u vidljivi dio spektra (dio elektromagnetskog spektra koji ljudsko oko može detektirati), koji obuhvaća valne duljine od 380 nm do 720 nm, pri čemu se manifestira gradijent energija fotona. Plava svjetlost, na donjoj

granici ovog spektra, ima fotone više energije u usporedbi s crvenom svjetlošću, koja je na gornjoj granici. Ova varijacija u energiji očituje se u sposobnosti fotona da pobudi elektrone na viša energetska stanja, pri čemu su fotoni plave svjetlosti učinkovitiji zbog veće energije. Vidljivo svjetlo čini značajan dio Sunčevog zračenja koje dopire do Zemlje, omogućujući fotosintezu u biljkama i osiguravajući energiju potrebnu za život na Zemlji.

Upravo je ovo zračenje ključno za život na Zemlji, pružajući toplinu i svjetlost neophodnu za fotosintezu i mnoge druge životne procese. Važno je napomenuti da je proces fuzije u Suncu izuzetno učinkovit. Iako se fuzija odvija samo u središnjem dijelu Sunca, koji čini oko 10% njegovog volumena, ona proizvodi dovoljno energije da održava cijelu zvijezdu i zrači energiju milijardama godina. Razumijevanje ovog procesa nije samo od znanstvenog interesa, već ima i praktične implikacije. Znanstvenici diljem svijeta rade na razvoju kontrolirane nuklearne fuzije kao potencijalnog izvora čiste energije na Zemlji [3]. Uspjeh u ovom području mogao bi revolucionirati našu proizvodnju energije, pružajući gotovo neiscrpan izvor čiste energije bez štetnih nusprodukata. Sunčeva energija, nastala kroz ovaj proces, neophodna je za život kakav poznajemo. Ona omogućuje život na Zemlji i oblikuje naš klimatski sustav, pokreće vremenske prilike i igra ključnu ulogu u globalnom kruženju vode.

Elektromagnetski spektar općenito predstavlja cjelokupni raspon elektromagnetskog zračenja, uključujući sve valne duljine od radio-valova do gama-zraka. Energija fotona obrnuto je proporcionalna njihovoj valnoj duljini, što je temeljno načelo u području kvantne mehanike. Ovaj odnos opisan je jednadžbom:

$$E_f = \frac{hc}{\lambda} \quad 2.1$$

gdje je  $E_f$  energija fotona,  $h$  Planckova konstanta,  $c$  brzina svjetlosti, a  $\lambda$  valna duljina zračenja. Gama-zrake, koje imaju najkraće valne duljine u elektromagnetskom spektru, posjeduju fotone najveće energije, često premašujući stotine keV. Nasuprot tome, radio-valovi, karakterizirani svojim dugim valnim duljinama, imaju fotone sa znatno nižim energijama, tipično u rasponu od  $\mu\text{eV}$  do  $\text{meV}$  [4]. Od dizajna optičkih uređaja do proučavanja astrofizičkih fenomena, važno je razumjeti kako se energija fotona mijenja duž spektra valnih duljina. Na primjer, visoka energija fotona gama-zraka omogućuje im prodiranje kroz materijale koji su nepropusni za fotone niže energije, čineći ih neprocjenjivima u medicinskom snimanju i astrofizičkim

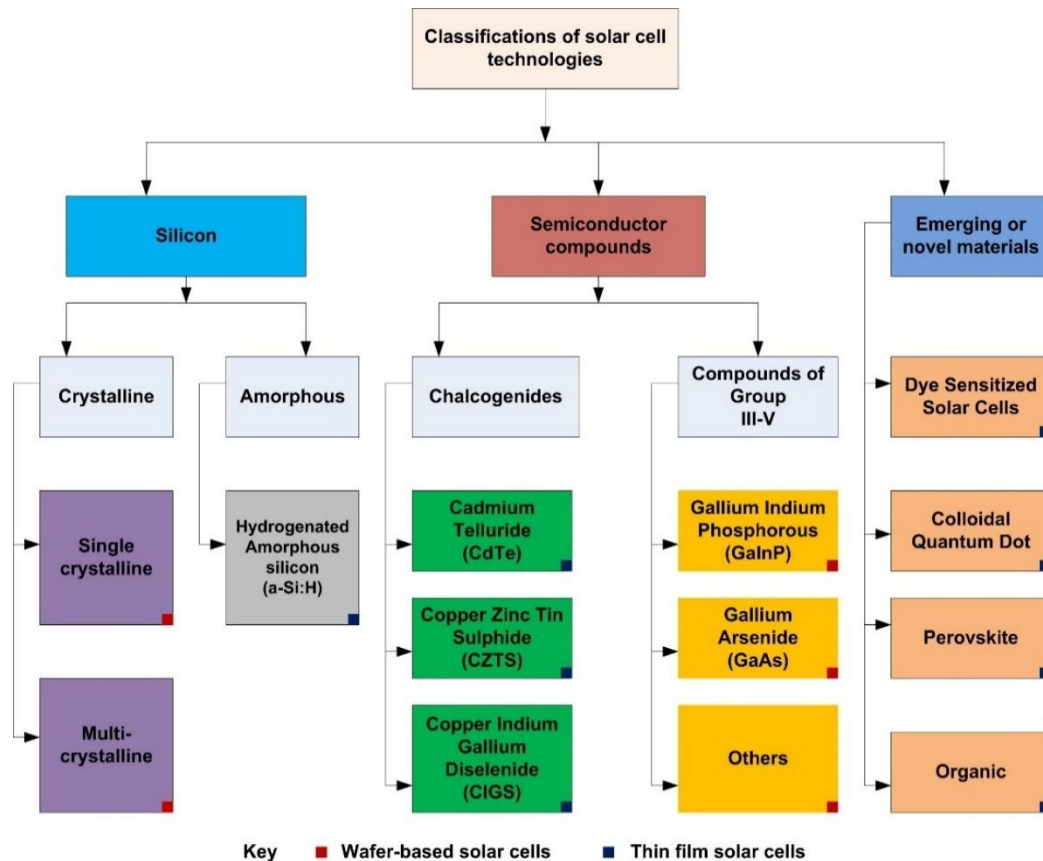
promatranjima. Nasuprot tome, fotoni radio valova, zahvaljujući svojoj niskoj energiji, pokazuju izvanrednu prikladnost za komunikacijske tehnologije. Njihova sposobnost prelaska velikih udaljenosti uz minimalno prigušenje čini ih optimalnim nositeljem informacija u bežičnoj komunikaciji.

## 2.2. FN tehnologije

FN tehnologija revolucionirala je sektor OIE, nudeći čistu i održivu alternativu konvencionalnim izvorima energije. Kako potražnja za Sunčevom energijom nastavlja rasti, razvijene su i usavršene različite vrste FN ćelija kako bi se zadovoljile različite potrebe i primjene, od kristalnih silicijskih ćelija prve generacije do novih koncepata treće generacije [4]. FN tehnologije se mogu klasificirati na više načina, najčešće je to prema materijalu izrade, slika 2.2., ili prema generaciji kojoj pripadaju, slika 2.3. Kristalne silicijske FN ćelije koje pripadaju prvoj generaciji FN ćelija, uključujući monokristalne (c-Si) i polikristalne (p-Si) varijante, dominiraju trenutnim FN tržištem s približno 95% udjela [5]. Ove se ćelije temelje na p-n spoju formiranom u silicijskoj pločici. Kada fotoni s energijom većom od širine zabranjenog pojasa silicija (1,1 eV) budu apsorbirani, generiraju se parovi elektron-šupljina koji se razdvajaju ugrađenim električnim poljem, proizvodeći foto-struju [6]. C-Si ćelije nude najviše komercijalne učinkovitosti, do 26,7% u laboratorijskim uvjetima [7]. Međutim, zahtijevaju silicij visoke čistoće i energetski intenzivnu proizvodnju. P-Si ćelije su jeftinije za proizvodnju, ali imaju nešto nižu učinkovitost, obično u rasponu 15-17%, a u laboratorijskim uvjetima do maksimalno 24,4% [8]. Prednosti kristalnih silicijskih ćelija uključuju dokazanu tehnologiju, dugoročnu stabilnost i relativno visoke učinkovitosti. Međutim, kruta struktura pločica i visoki troškovi materijala ograničavaju potencijal za smanjenje troškova. Proces proizvodnje uključuje uzgoj jednog kristalnog ingota koji se zatim reže u tanke pločice za stvaranje FN ćelija. S druge strane, p-Si ćelije izrađene su od više silicijskih kristala stopljenih zajedno i odlikuju se karakterističnom plavkastom bojom s vidljivim teksturama.

Tankoslojne FN ćelije predstavljaju drugu generaciju FN tehnologije, čineći oko 4-5% instaliranog FN kapaciteta. Ove ćelije izrađene su nanošenjem jednog ili više tankih slojeva FN materijala na podlogu. Glavne vrste tankoslojnih FN ćelija uključuju amorfnu silicij (a-Si), kadmij telurid (CdTe) i bakar indij galij selenid (CIGS) tehnologije. Svaka od ovih tehnologija ima svoje jedinstvene prednosti i ograničenja, kao što su fleksibilnost, niska proizvodna cijena ili dobra učinkovitost u uvjetima slabog osvjetljenja. A-Si koristi tanki sloj silicija deponiran na

podlozi s nižom učinkovitošću od 6-8%, ali s mogućnosti nanošenja na fleksibilne podloge. CdTe tehnologija je postigla značajan komercijalni uspjeh s učinkovitostima ćelija preko 18%, zahvaljujući niskim troškovima proizvodnje i dobrim performansama u vrućim klimama. CIGS je pokazao impresivnu laboratorijsku učinkovitost preko 23%, nudeći visoke koeficijente apsorpcije i mogućnost nanošenja na fleksibilne podloge, što ga čini obećavajućom opcijom za razne primjene [9].



Slika 2.2. Klasifikacija FN ćelija prema primarnom aktivnom materijalu [10]

FN tehnologije treće generacije predstavljaju vrhunac istraživanja i razvoja FN ćelija. Ove nove tehnologije imaju za cilj nadmašiti učinkovitost i isplativost tradicionalnih FN ćelija na bazi silicija. Neke od obećavajućih FN tehnologija treće generacije uključuju organske FN ćelije (engl. *organic photovoltaic solar cell* - OPV), FN ćelije osjetljive na boje (engl. *dye-sensitized solar cell* - DSSC) i perovskitne FN ćelije (engl. *perovskite solar cell* - PSC) [11]. OPV ćelije koriste organske materijale za apsorpciju svjetlosti i generiranje električne energije, nudeći nisku proizvodnu cijenu i fleksibilnost [12]. DSSC ćelije, poznate i kao Grätzelove ćelije, koriste fotoosjetljivu boju za apsorpciju svjetlosti i oponašaju proces fotosinteze u biljkama



[13]. PSC ćelije pojavile su se kao jedna od najperspektivnijih tehnologija treće generacije zbog svoje brzo rastuće učinkovitosti i niskih troškova proizvodnje [14]. Višespojne FN ćelije koriste više slojeva različitih poluvodičkih materijala za apsorpciju šireg spektra svjetlosti, što rezultira većom učinkovitošću. Iako nude najvišu učinkovitost od svih FN tehnologija, s laboratorijskim učinkovitostima koje prelaze 40%, njihovi visoki troškovi proizvodnje i složeni proizvodni proces ograničavaju njihovu širu primjenu [15].



Slika 2.3. Komponente FN sustava i podjela FN tehnologija po generacijama

Kako FN tehnologija nastavlja napredovati, istražuju se nove primjene i poboljšanja. FN sustavi integrirani u zgrade (engl. *building integrated photovoltaics - BIPV*) uključuju ugradnju FN ćelija u građevinske materijale poput krovova, fasada i prozora, omogućujući besprijekornu integraciju proizvodnje FN energije u arhitektonske dizajne. Tandemske FN ćelije kombiniraju različite FN tehnologije kako bi postigle veću učinkovitost, s PSC-Si tandemskim ćelijama koje pokazuju obećavajuće rezultate s učinkovitostima koje se približavaju 29%. Tankoslojne tehnologije, posebno OPV i PSC, omogućuju razvoj fleksibilnih i laganih FN ćelija. Oni se mogu koristiti u različitim primjenama, uključujući nosive elektroničke uređaje, automobilsku integraciju i prijenosne izvore napajanja. Neke FN tehnologije treće generacije, poput OPV i DSSC, pokazuju izvrsne performanse u uvjetima slabog ozračenja. To ih čini prikladnima za prikupljanje energije u zatvorenom prostoru, proširujući potencijal za korištenje Sunčeve energije. Zaključno, područje FN tehnologije je raznoliko i brzo se razvija. Dok kristalne

silicijske FN ćelije i dalje dominiraju tržištem zbog svoje dokazane pouzdanosti i dobre učinkovitosti, tankoslojne tehnologije i tehnologije treće generacije nude jedinstvene prednosti u pogledu troškova, fleksibilnosti i specijaliziranih primjena. Kako se nastavljaju napori u istraživanju i razvoju, možemo očekivati daljnja poboljšanja u učinkovitosti, stabilnosti i isplativosti svih FN tehnologija.

### **2.3. Standardi za analizu performansi FN ćelija**

Razvoj tehnologije FN ćelija doveo je do potrebe za preciznijim metodama procjene njihovih performansi. Međunarodna elektrotehnička komisija (engl. *International Electrotechnical Commission - IEC*) odgovorila je na ovu potrebu razvojem serije standarda IEC 61853, koja predstavlja značajan napredak u odnosu na ranije metode testiranja i ocjenjivanja FN ćelija [16]. Ova serija standarda, koja se sastoji od četiri dijela, ima za cilj pružiti realniju procjenu performansi FN ćelija u različitim uvjetima rada, nadopunjujući tako postojeće standarde poput IEC 61215 [17]. Prvi dio serije, IEC 61853-1, objavljen 2011. godine, uvodi inovativni pristup mjerenju performansi FN ćelija kroz matricu koja obuhvaća sedam razina ozračenja, od 100 W/m<sup>2</sup> do 1100 W/m<sup>2</sup> [18], što je prikazano u tablici 2.1. Brojevi u tablici označavaju potreban broj mjerenja prilikom ispitivanja FN ćelija po standardu IEC 61853-1. Ovaj pristup omogućuje procjenu performansi FN ćelija u širokom rasponu uvjeta ozračenja, što je bitno za razumijevanje njihovog ponašanja u stvarnim uvjetima rada. Mjerenja se mogu provoditi na dva načina: pod prirodnim Sunčevim svjetlom koristeći sustav za praćenje Sunca ili u laboratorijskim uvjetima pomoću solarnog simulatora. Svaka od ovih metoda ima svoje prednosti; mjerenja pod prirodnim svjetlom pružaju realističniju procjenu, dok laboratorijska mjerenja omogućuju veću kontrolu i ponovljivost [19]. Važno je napomenuti da IEC 61853-1 ne zamjenjuje standard IEC 61215 nego se ovi standardi međusobno nadopunjuju, pružajući sveobuhvatan okvir za procjenu kvalitete i performansi FN ćelija. IEC 61215 ostaje ključan za osnovnu kvalifikaciju FN ćelija, dok IEC 61853 pruža detaljniju analizu performansi u različitim uvjetima rada. Dok IEC 61215 definira STC koji uključuju ozračenje od 1000 W/m<sup>2</sup>, spektralnu distribuciju koja odgovara masi zraka AM 1.5 i temperaturu ćelije od 25°C, IEC 61853-1 proširuje opseg testiranja na različite razine ozračenja i temperature. Ovo proširenje omogućuje detaljniju analizu performansi ćelija u uvjetima koji bolje odražavaju stvarne radne uvjete.

Drugi dio serije spomenutog standarda, IEC 61853-2, fokusira se na mjerenje utjecaja kuta upada svjetlosti na performanse FN ćelija. Ovaj aspekt je posebno važan za razumijevanje kako različiti položaji Sunca tijekom dana i godine utječu na proizvodnju energije. Treći dio, IEC 61853-3, integrira podatke iz prethodna dva dijela s lokalnim klimatskim podacima kako bi se procijenila godišnja energetska proizvodnja ćelija. Ovaj holistički pristup omogućuje preciznije predviđanje stvarnih performansi ćelija na specifičnim geografskim lokacijama. Četvrti dio serije, IEC 61853-4, pruža smjernice za prikupljanje i analizu podataka potrebnih za procjenu dugoročne pouzdanosti i performansi FN ćelija. Ovaj dio je posebno važan za operatere FN elektrana i investitore, jer omogućuje bolje razumijevanje dugoročne stabilnosti i degradacije performansi ćelija.

*Tablica 2.1. IEC 61853-1 matrica uvjeta ispitivanja [18]*

Ozračenje W/m <sup>2</sup>	Temperatura ćelija			
	15 °C	25 °C	50 °C	75 °C
<b>1100</b>		1	2	3
<b>1000</b>	4	5	6	7
<b>800</b>	8	9	10	11
<b>600</b>	12	13	14	15
<b>400</b>	16	17	18	
<b>200</b>	19	20	21	
<b>100</b>	22	23		

Unatoč značajnim unapređenjima koje donosi serija IEC 61853, postoje određena ograničenja koja treba uzeti u obzir. Jedno od njih je korištenje samo jednog spektra Sunčevog zračenja (AM 1.5) u testiranjima, što može ograničiti točnost simulacija za različite geografske lokacije s različitim atmosferskim uvjetima. Ovo ograničenje naglašava potrebu za daljnjim razvojem standarda koji bi mogli uključiti širi raspon spektralnih distribucija. Implementacija serije standarda IEC 61853 ima značajne implikacije za FN industriju. Proizvođači FN ćelija dobili su alat za detaljniju karakterizaciju svojih proizvoda, što im omogućuje optimizaciju dizajna za različite klimatske uvjete. S druge strane, kupci i projektanti FN sustava dobivaju pouzdanije informacije o očekivanim performansama FN ćelija u stvarnim uvjetima rada, što olakšava odabir najprikladnijih ćelija za specifične projekte. Razvoj serije standarda IEC 61853 odražava evoluciju industrije FN ćelija prema sve sofisticiranijim i preciznijim metodama procjene performansi. Ovaj trend je u skladu s rastućom važnošću Sunčeve energije u globalnom energetskom sustavu i potrebom za optimizacijom FN sustava za različite klimatske uvjete.

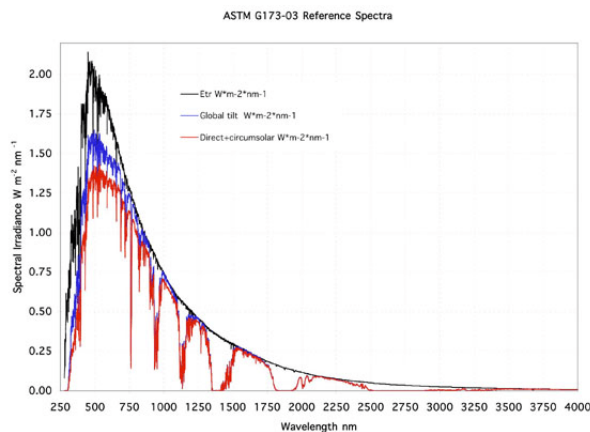
Dakle, serija standarda IEC 61853 predstavlja značajan korak naprijed u procjeni performansi FN ćelija, pružajući cjelovitiji i realniji pristup testiranju i ocjenjivanju. Ovi standardi unapređuju kvalitetu i pouzdanost FN ćelija, ali i potiču inovacije u industriji FN panela. Međutim, kao i sa svim standardima, postoji prostor za daljnja poboljšanja, posebno u pogledu spektralne karakterizacije i prilagodbe različitim geografskim lokacijama. Kontinuirani razvoj i redefiniranje ovih standarda bit će važni za podršku daljnjem rastu i unapređenju korištenja Sunčeve energije kao ključnog izvora obnovljive energije u budućnosti.

#### **2.4. Standardni AM 1.5 spektar**

Referentni spektar AM 1.5 bitan je koncept u području Sunčeve energije i FN sustava. Ovaj standardizirani spektar predstavlja prosječnu spektralnu raspodjelu Sunčevog zračenja na Zemljinoj površini pod specifičnim atmosferskim uvjetima. Oznaka *AM* označava masu zraka, što se odnosi na duljinu puta koju Sunčevo zračenje prolazi kroz atmosferu prije nego što dosegne Zemljinu površinu s obzirom na najkraću putanju. Broj 1,5 u oznaci AM 1.5 označava da Sunčeve zrake prolaze kroz 1,5 puta duži put kroz atmosferu u odnosu na okomiti put, što odgovara kutu upada Sunčevog zračenja od približno  $48,2^\circ$  u odnosu na zenit [20].

Referentni spektar AM 1.5 definiran je standardom G173-03 [21] i koristi se u industriji i istraživanju za karakterizaciju i usporedbu performansi različitih FN ćelija. Ovaj spektar obuhvaća raspon valnih duljina od UV do IR područja, s ukupnim ozračenjem od  $1000 \text{ W/m}^2$  na razini mora. Važno je napomenuti da se referentni spektar AM 1.5 razlikuje od ekstraterestričkog Sunčevog spektra (AM 0) koji se mjeri izvan Zemljine atmosfere. Prolaskom kroz atmosferu, Sunčevo zračenje podliježe različitim procesima apsorpcije i raspršenja, što rezultira promjenama u spektralnoj raspodjeli energije. Glavni atmosferski čimbenici koji utječu na oblik spektra AM 1.5 uključuju apsorpciju od strane molekula vode, ugljikovog dioksida i ozona, kao i Rayleighovo raspršenje na molekulama zraka [22]. Na slici 2.4. može se vidjeti referentni AM 1.5. spektar, ekstraterestrički spektar AM 0 i direktni normalni spektar (spektar Sunčevog zračenja koje dopijeva do površine okomite na Sunčeve zrake bez raspršivanja ili refleksije od atmosfere.). Referentni spektar AM 1.5 igra važnu ulogu u dizajnu i optimizaciji FN ćelija. Proizvođači i istraživači koriste ovaj standard za procjenu učinkovitosti pretvorbe energije različitih materijala i struktura FN ćelija pod standardiziranim uvjetima. To omogućuje pouzdanu usporedbu performansi različitih tehnologija FN ćelija, neovisno o geografskoj lokaciji ili vremenskim uvjetima. Nadalje, referentni spektar AM 1.5 služi kao

osnova za izračun teoretskih granica učinkovitosti FN ćelija, poput Shockley-Queisserove granice za jednospojne FN ćelije. Razumijevanje i primjena referentnog spektra AM 1.5 važni su za razvoj novih materijala i struktura FN ćelija optimiziranih za maksimalnu apsorpciju Sunčevog zračenja. To uključuje istraživanja u području višespojnih FN ćelija, kvantnih točaka i drugih naprednih koncepta koji ciljaju na proširenje spektralnog odziva i povećanje ukupne učinkovitosti pretvorbe energije [20]. Važno je napomenuti da, iako referentni spektar AM 1.5 pruža standardizirani okvir za karakterizaciju FN ćelija, stvarni uvjeti na terenu mogu značajno odstupati od ovog slučaja. Faktori poput geografske širine, nadmorske visine, godišnjeg doba i lokalnih atmosferskih uvjeta mogu utjecati na stvarni spektar Sunčevog zračenja koji upada na FN ćelije [22]. Stoga se u praksi često koriste sofisticirani modeli i simulacije za predviđanje performansi FN sustava u različitim realnim scenarijima, uzimajući u obzir varijacije u spektru Sunčevog zračenja tijekom dana i godine.



*Slika 2.4. Referentni AM 1.5. spektar, ekstrasolarni spektar AM 0 i direktni normalni spektar*

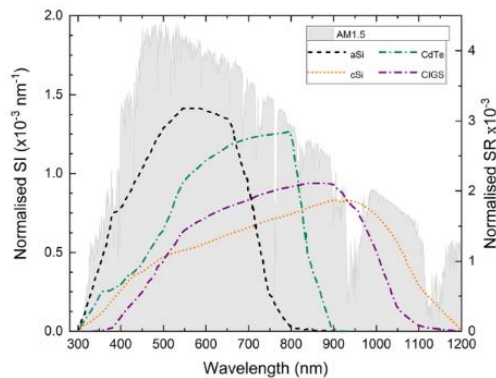
Standardni spektar AM 1.5 prvi je put predložen 1982. godine od strane odbora E44 za Sunčevu, geotermalnu i druge oblike alternativnih izvora energije Američke udruge za ispitivanje i materijale (engl. *American Society for Testing and Materials - ASTM*) kroz pododbor E44-02 za parametre okoliša. Kontinuirani razvoj znanstvenih spoznaja nerijetko iziskuje reviziju prethodnih nalaza. Sukladno tome, izvorni rezultati bili su predmetom opetovanih evaluacija, što je rezultiralo znatnim preinakama. Ove su revizije proizašle iz novih empirijskih podataka i suvremenih znanstvenih radova objavljenih u relevantnom području istraživanja, pružajući tako okvir za neophodne korekcije inicijalnih zaključaka.

## 2.5. Spektralni odziv FN ćelija

Spektralni odziv (engl. *spectral response* - *SR*) opisuje kako FN ćelija reagira na svjetlost različitih valnih duljina. To je važna karakteristika koja određuje učinkovitost pretvorbe Sunčeve energije u električnu energiju. Po definiciji predstavlja omjer struje koju generira FN ćelija i snage upadnog zračenja na ćeliju u funkciji valne duljine svjetlosti. Izražava se obično u jedinicama A/W [23]. U FN ćeliji, upadni foton osigurava energiju potrebnu za pobuđivanje elektrona iz valentne u vodljivu vrpce, ostavljajući šupljinu na njegovom mjestu. Ovo razdvajanje naboja stvara električno polje koje pruža silu za pokretanje struje kroz vanjski strujni krug. Veličina razmaka između valentne i vodljive vrpce poznata je kao širina zabranjenog pojasa,  $E_g$ . Kada foton s dovoljno energije ( $E_f \geq E_g$ ) udari u poluvodič, on može pobuditi elektron iz valentne u vodljivu vrpce, stvarajući par elektron-šupljina, što dovodi do razdvajanja naboja unutar materijala. Razdvojeni naboji stvaraju električno polje koje zatim pokreće struju kroz vanjski strujni krug, proizvodeći tako električnu energiju. [24]. Fotoni s energijom manjom od  $E_g$  ne mogu generirati parove elektron-šupljina. S druge strane, fotoni s energijom znatno većom od  $E_g$  gube višak energije kao toplinu. *SR* je usko povezan s kvantnom učinkovitošću (*QE*). Dok *QE* daje broj generiranih elektrona koji sudjeluju u foto-generiranoj struji po upadnom fotonu, *SR* daje omjer foto-generirane struje i upadne snage zračenja. Tipična krivulja *SR* ima maksimum na valnim duljinama blizu zabranjenog pojasa materijala, a opada na kraćim i dužim valnim duljinama [25]. Različite FN tehnologije imaju različite krivulje *SR* zbog razlika u širini zabranjenog pojasa i optičkim svojstvima. *SR* određuje kako će FN ćelija reagirati na različite spektre Sunčevog zračenja, koji variraju ovisno o atmosferskim uvjetima, dobu dana i godišnjem dobu. Obično se mjeri izlaganjem FN ćelije monokromatskoj svjetlosti različitih valnih duljina i mjerenjem generirane struje kratkog spoja. *SR* nekoliko uobičajenih FN tehnologija, konkretno a-Si, c-Si, CdTe i CIGS prikazani su na slici 2.5. [26]. Referentni spektar AM 1.5, normaliziran između 300 nm i 1200 nm, prikazan je u pozadini radi usporedbe. A-Si se ističe boljim odzivom na kraćim valnim duljinama, što mu daje prednost u oblačnim uvjetima [27]. S druge strane, CdTe tehnologija pokazuje izrazitu osjetljivost na promjene u atmosferskom sadržaju vodene pare. Varijacije u količini taložne vode mogu uzrokovati oscilacije u performansama CdTe ćelija do čak 6% [28]. Ova osjetljivost naglašava važnost razumijevanja lokalnih atmosferskih uvjeta pri projektiranju CdTe FN sustava, posebno u područjima s visokom vlagom zraka ili značajnim sezonskim promjenama u atmosferskom vodenom sadržaju. C-Si koji je trenutno dominantna tehnologija na tržištu, osjetljiviji je na širi raspon valnih duljina u usporedbi s tehnologijama tankog filma. Međutim, ni c-Si ćelije nisu

imune na spektralne promjene. Iako su varijacije u performansama manje izražene nego kod drugih tehnologija, one i dalje postoje i mogu utjecati na ukupnu učinkovitost sustava, posebno tijekom dužih vremenskih perioda. Koncentratorske FN tehnologije (engl. *concentrator photovoltaics* - CPV) pokazuju najizraženiju osjetljivost na spektralne promjene, s varijacijama u performansama koje mogu doseći čak 30% [26]. Ova visoka osjetljivost proizlazi iz uske spektralne osjetljivosti višespojnih ćelija koje se koriste u CPV sustavima, kao i iz činjenice da CPV sustavi koriste samo direktno Sunčevo zračenje.

Ove razlike u spektralnim odzivima različitih FN tehnologija naglašavaju kritičnu važnost razumijevanja i preciznog modeliranja spektralnih efekata za točno predviđanje performansi FN sustava u stvarnim uvjetima rada. Bez uzimanja u obzir ovih efekata, procjene proizvodnje energije mogu biti značajno pogrešne, što može dovesti do neoptimalnog dizajna sustava ili netočnih financijskih projekcija. Stoga je važno da inženjeri i projektanti FN sustava integriraju spektralne modele u svoje alate za predviđanje performansi, prilagođavajući ih specifičnim tehnologijama i lokalnim klimatskim uvjetima.



Slika 2.5. Spektralni odzivi a-Si, c-Si, CdTe i CIGS tehnologija [26]

### **3. UTJECAJ SPEKTRA SUNČEVOG ZRAČENJA NA UČINKOVITOST FN ĆELIJE**

#### **3.1. Razlozi zanemarivanja spektra Sunčevog zračenja**

Jedan od razloga čestog izostanka detaljnih mjerenja spektra Sunčevog zračenja leži u skupoj opremi potrebnoj za takva mjerenja. Drugi razlog je pretpostavka da spektar Sunčevog zračenja nema značajan utjecaj na učinkovitost FN ćelija napravljenih od silicija, koji je najčešće korišten materijal za njihovu izradu. Ova pretpostavka proizlazi iz činjenice da silicij relativno dobro apsorbira širok spektar Sunčevog zračenja, pa se promjene u spektralnoj distribuciji ne smatraju kritičnima za njegovu učinkovitost [29]. Silicij ima sposobnost apsorpcije fotona u širokom rasponu valnih duljina, što ga čini primjenjivim kod različitih vrijednosti ozračenja. Međutim, postoje određeni dijelovi spektra koje silicij ne može učinkovito iskoristiti, što dovodi do gubitaka energije i smanjene ukupne učinkovitosti FN sustava. S napretkom tehnologije i razvojem novih materijala za FN ćelije, postaje sve jasnije da je detaljno razumijevanje spektra Sunčevog zračenja sve važnije za optimizaciju učinkovitosti. Novi materijali, poput višespojnih ili DSSC FN ćelija, mogu biti osjetljivi na specifične dijelove spektra. Atmosferski uvjeti, kao što su oblačnost, vlažnost i zagađenje zraka, mogu promijeniti spektralnu distribuciju Sunčevog zračenja koje doseže površinu Zemlje. Ove promjene mogu imati različite učinke na različite vrste FN ćelija, ovisno o njihovim specifičnim spektralnim odzivima. Stoga, mjerenje i razumijevanje Sunčevog spektra postaje bitno za razvoj učinkovitijih FN sustava, optimizaciju njihovog rada u različitim uvjetima i poboljšanje ukupne proizvodnje energije. S napretkom u tehnologijama mjerenja i smanjenjem troškova opreme, očekuje se da će detaljno praćenje spektra Sunčevog zračenja postati standardna praksa u industriji Sunčeve energije, omogućujući daljnji napredak u učinkovitosti i pouzdanosti FN sustava.

#### **3.2. Okolišne varijable koje utječu na spektar**

Kao što je rečeno u ranijim poglavljima, FN ćelije se obično testiraju pri STC koji podrazumijevaju ozračenje od  $1000 \text{ W/m}^2$  pri temperaturi ćelije od  $25^\circ\text{C}$  i Sunčevom spektru AM 1.5. Međutim, ovi laboratorijski uvjeti ne odražavaju varijabilnost s kojom se susrećemo u stvarnim scenarijima. U praksi, geografski i meteorološki čimbenici značajno utječu na performanse FN ćelije. Učinkovitost FN ćelija određuju tri ključna faktora: temperatura ćelije,

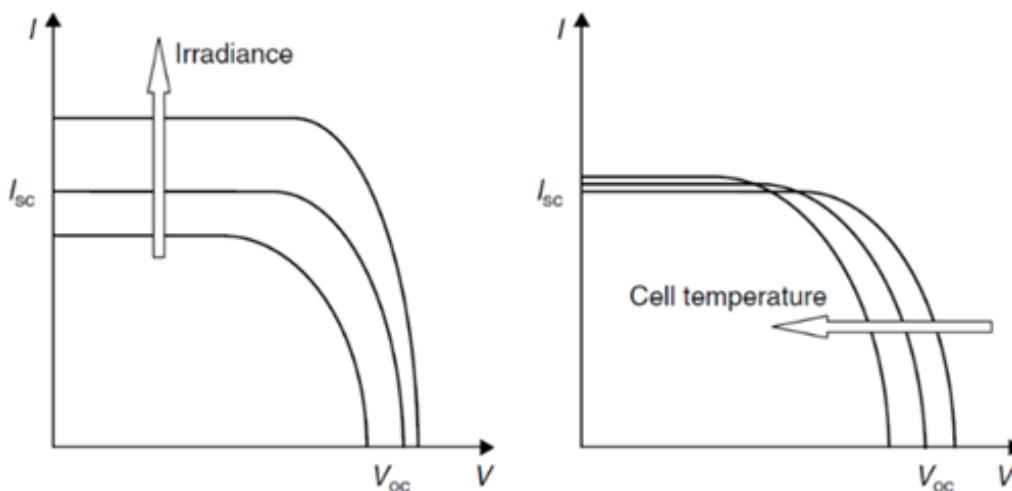


ozračenje i spektar Sunčevog zračenja. Dok se temperatura ćelije i ozračenje uglavnom mjere na FN instalacijama, mjerenja spektra Sunčevog zračenja su relativno rijetka, provode se sporadično i na ograničenim lokacijama širom svijeta. Ova razlika u praksi mjerenja može dovesti do netočnosti u predviđanjima performansi, posebno kada se koriste metrički pokazatelji poput omjera performansi, koji obično zanemaruju spektralne varijacije [29]. Promjene temperature utječu na električne karakteristike FN ćelija, učinkovitost obično opada s porastom temperature okoline. Vlažnost također može utjecati na performanse mijenjanjem optičkih svojstava okoline oko FN ćelija. Takve varijable okoliša doprinose performansama koje se značajno razlikuju od onih postignutih tijekom testiranja pri STC uvjetima.

Iako korištenje samo jednog standardnog spektra ne može u potpunosti predstaviti sve realne uvjete u kojima FN sustavi rade, ono pruža čvrstu osnovu za njihovo standardizirano testiranje i usporedbu. Međutim, ovaj pristup zanemaruje varijacije spektra, što unosi nesigurnost u predviđanja proizvodnje solarne energije. Studije ističu da AM 1.5 spektar, iako standardiziran, ne uzima u obzir stvarne spektralne varijacije uzrokovane čimbenicima poput atmosferskih uvjeta, geografskog položaja i sezonskih promjena. Primjerice, istraživanja pokazuju da pješčane oluje i zagađenje zraka u urbanim sredinama značajno utječu na performanse FN sustava mijenjajući upadni Sunčev spektar, čime utječu na predviđanja energetske izlaza [30]. Inherentna spektralna osjetljivost različitih FN materijala čini ih podložnima promjenama u spektru Sunčevog zračenja, što može uzrokovati odstupanja između očekivanih i stvarnih performansi sustava. [31]. Točna predviđanja energije zahtijevaju poboljšane standarde testiranja i metodologije koje uzimaju u obzir ove spektralne varijacije, smanjujući nesigurnost i poboljšavajući pouzdanost predviđanja proizvodnje FN sustava [32].

Unatoč svemu navedenome, brojni znanstveni radovi objavljeni u zadnjih nekoliko godina koji se bave utjecajem okolišnih varijabli na učinkovitost FN ćelija u potpunosti zanemaruju ili samo usput spominju utjecaj spektra Sunčevog zračenja. Knjiga [33] pruža sveobuhvatan pregled principa, komponenti, dizajna i primjene FN sustava. Također pokriva povijesni razvoj korištenja Sunčeve energije, analizu solarne geometrije, metode mjerenja ozračenja i ekonomske aspekte implementacije solarnih tehnologija. U trećem poglavlju detaljno su obrađeni fizikalni principi koji stoje iza rada FN ćelija. Također objašnjava osnovne principe rada FN ćelija, uključujući generaciju struje, naponsko-strujne karakteristike i faktore koji utječu na učinkovitost, ali utjecaj spektra Sunčevog zračenja spomenut je samo u kratkom dodatnom odlomku na kraju knjige.

Rad [34] također detaljno analizira faktore koji utječu na performanse FN sustava, ali u potpunosti zanemaruje utjecaj spektra. Ključni faktor koji se ističe je temperatura ćelije, koja značajno utječe na učinkovitost i izlaznu energiju sustava. Autori naglašavaju da povećanje ozračenja logaritamski povećava napon otvorenog kruga ( $V_{oc}$ ), dok struja kratkog spoja ( $I_{sc}$ ) raste linearno. Ovo dovodi do ukupnog povećanja izlazne snage. Međutim, porast temperature ćelije primarno utječe na  $V_{oc}$ , što rezultira padom učinkovitosti ćelije. Na slici 3.1. [35] se može vidjeti utjecaj ozračenja i temperature ćelije na  $I_{sc}$  i  $V_{oc}$ . U radu [34] je predstavljena formula za izračun temperature ćelije na temelju temperature zraka, ozračenja i nominalne radne temperature ćelije (engl. *normal operating cell temperature* - *NOCT*). NOCT predstavlja temperaturu koju FN ćelija dostiže pri određenim okolišnim uvjetima, simulirajući tipične vanjske okolnosti. Definirana je pri ozračenju od  $800 \text{ W/m}^2$ , temperaturi zraka od  $20^\circ\text{C}$ , brzini vjetra od  $1 \text{ m/s}$ , s panelom montiranim na otvorenom nosaču.



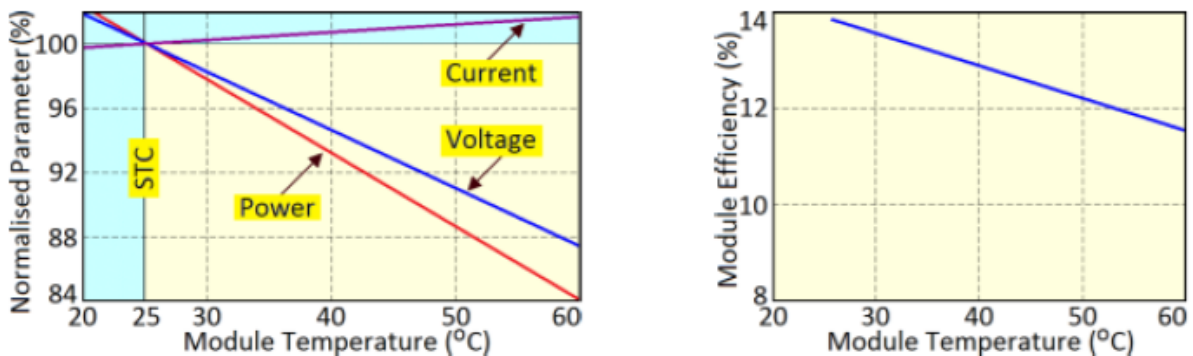
Slika 3.1. Utjecaj ozračenja i temperature ćelije na  $I_{sc}$  i  $V_{oc}$  [35]

Još nekoliko studija je fokusirano na utjecaj temperature i ozračenja na performanse FN ćelije [36], [37], [38]. Naglašeno je da je fenomen negativnog utjecaja povećanja temperature FN ćelije na učinkovitost i izlaznu snagu FN sustava prvenstveno uzrokovan povećanjem unutarnje rekombinacije nositelja naboja uslijed njihove povećane koncentracije pri višim temperaturama. Temperatura FN ćelije raste s povećanjem ozračenja i temperature zraka, ali se smanjuje s povećanjem brzine vjetra. Tijekom ljetnih podnevnih sati, kada je zračenje vrlo intenzivno, temperature FN ćelija mogu doseći i  $60\text{--}65^\circ\text{C}$  [36]. Utjecaj temperature FN ćelije na njene performanse je višestruk. S porastom temperature dolazi do blagog povećanja struje

ćelije, ali istovremeno i do značajnog pada napona. Ukupni rezultat je smanjenje izlazne snage ćelije s porastom temperature. Općenito, gubitak učinkovitosti silicijskih ćelija iznosi oko 0,5% po stupnju Celzija povećanja temperature. Detaljnija analiza pokazuje da se  $V_{oc}$  smanjuje za 0,1-0,3 V za svaki stupanj Celzija porasta temperature, dok se  $I_{sc}$  povećava za 2,3-4 mA/K. Međutim, ukupni učinak ovih promjena rezultira smanjenjem izlazne snage za oko 0,4-0,5% po stupnju porasta temperature FN ćelije [38]. Ovi podaci jasno ukazuju na važnost kontrole temperature FN ćelije za optimizaciju njihove učinkovitosti i izlazne snage što se vidi na slici 3.2. [36]. Temperaturna dinamika ćelije, ovisna o brojnim faktorima, često se opisuje matematičkim modelom [39], koji se izdvojio svojom širom primjenom:

$$T_{cell} = T_{amb} + E \cdot \exp(-a - b \cdot v_v) + \Delta T \cdot \frac{E}{1000} \quad 3.1$$

gdje su  $a$ ,  $b$  i  $\Delta T$  empirijski dobivene konstante,  $v_v$  je brzina vjetra,  $E$  ozračenje i  $T_{amb}$  temperatura zraka.



Slika 3.2. Utjecaj temperature FN ćelije na njenu izlaznu snagu i učinkovitost [36]

Procedura za određivanje NOCT uključena u IEC standarde i opisana u radu [34] temelji se na činjenici da se razlika između temperature ćelija i temperature okoliša može smatrati neovisnom o temperaturi zraka i linearno proporcionalnom ozračenju na razinama iznad 400 W/m<sup>2</sup>. U slučaju da imamo dostupnu NOCT, temperaturu zraka i ozračenje moguće je koristiti spomenutu formulu za određivanje temperature ćelije:

$$T_{cell} = T_{amb} + (NOCT - 20) \cdot \frac{E}{800} \quad 3.2$$

### 3.3. Početci razmatranja utjecaja Sunčevog spektra na performanse FN ćelije

Kao što je spomenuto u prethodnom poglavlju, referentni AM 1.5 spektar je prvi put standardiziran 1982. godine po uzoru na ekstraterestrički Sunčev spektar AM 0 kako bi se omogućila dosljedna procjena performansi FN ćelija te kako bi se osigurala usporedivost rezultata testiranja solarnih tehnologija diljem svijeta [40]. Utjecaj spektra Sunčevog zračenja na proizvodnju FN ćelija počeo se od tada intenzivnije istraživati.

Godine 1986. američki Institut za istraživanje Sunčeve energije (engl. *Solar Energy Research Institute - SERI*) je pokrenuo zajedničku studiju sa sudionicima iz industrije, akademske zajednice i vlade SAD-a kako bi ispitaio odziv FN uređaja na promjene u spektralnom sadržaju Sunčevog zračenja. Svrha je bila potaknuti svijest o prirodnim, vanjskim varijacijama u spektru Sunčevog zračenja i utjecaju tih varijacija na performanse FN ćelija. Svi radovi objavljeni u sklopu ove studije objedinjeni su u izvještaju [41] i predstavljaju temelj za daljnja istraživanja u ovom području. Otkriveno je da spektar Sunčevog zračenja i njegov utjecaj na FN ćelije značajno varira s obzirom na vrstu materijala od kojeg je ćelija izrađena, parametru ćelije koju promatramo (npr. efikasnost ili izlazna snaga), razdoblju koje se promatra te raznim okolišnim varijablama. Otkriveno je da a-Si FN ćelije pokazuju veće mjesečne varijacije u performansama nego c-Si FN ćelije, sa standardnim odstupanjima od 4.7% i razlikama između ekstremnih vrijednosti od 16%. Spektralni učinci mogu predstavljati problem kada se uspoređuju različite FN tehnologije ili prati napredak efikasnosti uređaja. Ovi učinci moraju biti eliminirani usporedbom pod istim uvjetima okoliša ili procijenjeni i uključeni u nesigurnost mjerenja performansi. U izvještaju [41] je zaključeno da bi usporedbe performansi ćelija različitih FN tehnologija bile manje točne ako bi se podaci uzimali samo tokom jednog zimskog ili ljetnog mjeseca zbog sezonskih spektralnih varijacija.

Izvještaj [41] opisuje različite metode za kvantificiranje spektralne osjetljivosti FN uređaja, uključujući vanjska testiranja, unutarnja testiranja koristeći simulatore i modele performansi FN ćelija. Analize spektralne osjetljivosti zahtijevaju definiranje atmosferskih i zračnih uvjeta koje spektralno Sunčevo zračenje predstavlja. Ovo uključuje specificiranje parametara kao što su masa zraka, atmosferski uvjeti, albedo tla i komponente Sunčevog zračenja. Predloženo je nekoliko koraka za buduća istraživanja: eksplicitno dokumentirati parametre studije, uključujući lokaciju, doba dana/godine, uvjete neba i točne referentne spektre, kvantificirati performanse FN uređaja u rasponu atmosferskih i zračnih uvjeta tijekom predviđenog

operativnog perioda i prikupljati spektralna mjerenja tijekom evaluacija performansi kako bi se spektralni učinci uključili u analizu varijacija performansi. Izvještaj [41] je temeljni dokument koji je doprinio svijesti i analizi spektralnih učinaka na performanse FN uređaja. Naglašava važnost razmatranja spektralnih varijacija kako u dizajnu tako i u evaluaciji FN tehnologija kako bi se osigurale optimalne performanse u stvarnim uvjetima.

Tijekom devedesetih godina 20. stoljeća objavljeno je više studija koje su se bavile ovom problematikom i isticale problematiku zanemarivanja utjecaja spektra Sunčevog zračenja na efikasnost FN ćelija kod međunarodnih standarda od koji vrijedi istaći rad [42] u kojem je istražen utjecaj varijacija u spektru Sunčevog zračenja na učinkovitost FN ćelija koristeći model SEDES2. Dokazano je da postoji značajna razlika u učinkovitosti a-Si zimi i ljeti zbog spektralnih efekata. Predložena je nova shema višestrukog energetskog ocjenjivanja koja uzima u obzir specifične meteorološke uvjete i kritična razdoblja rada, čime se omogućuje točnija procjena performansi FN ćelija u stvarnim uvjetima.

U radu [43] razvijena je i validirana spektralna metoda za proračun maksimalnog izlaza FN ćelija uzimajući u obzir spektar Sunčevog zračenja. Spektralna metoda pokazala je bolju usklađenost s izmjerenim vrijednostima za a-Si FN ćelije u usporedbi s konvencionalnom metodom. Prirodno Sunčevo svjetlo pruža 3% više dostupnog spektralnog zračenja za p-Si i 9% više za a-Si u usporedbi s referentnim Sunčevim svjetlom. Spektralna metoda je posebno učinkovita za a-Si FN ćelije, pružajući precizniju procjenu godišnjeg izlaza. Isti autori su nastavili istraživanje u ovom području i promatrali kako promjene u spektru Sunčevog zračenja utječu na izlaz FN ćelije [44]. Mjerenja su provedena na krovu Kagurazaka kampusa u Japanu tijekom jedne godine, a rezultati su pokazali da sezonske promjene u spektru Sunčevog zračenja uzrokuju varijacije u izlazu FN ćelije. Za p-Si, varijacija izlaza iznosi 4%, dok za a-Si iznosi 20%. A-Si je osjetljiviji na promjene spektra zbog užeg spektralnog raspona. Studija naglašava važnost uzimanja u obzir sezonskih promjena spektra za optimalan dizajn FN sustava.

### **3.4. Matematičko opisivanje spektra Sunčevog zračenja**

Spektralna karakterizacija je proces opisivanja i kvantificiranja svojstava Sunčevog spektra koji utječe na performanse FN ćelije, a time i FN sustava u cjelini. Cilj spektralne karakterizacije je omogućiti preciznije modeliranje utjecaja spektra na performanse FN sustava u realnim radnim uvjetima, u usporedbi sa STC. To se postiže kroz razvoj funkcija spektralne korekcije (SCF)

koje koriste ove karakterizacijske parametre. Postoje dva glavna pristupa spektralnoj karakterizaciji, korištenje zamjenskih varijabli i korištenje vrijednosti izvedenih izravno iz spektra.

Zamjenske varijable su okolišni faktori koji se smatraju dominantnim čimbenicima koji utječu na Sunčev spektar. Koriste se kao neizravni pokazatelji oblika prevladavajućeg spektra. Neki od primjera uključuju masu zraka ( $AM$ ), indeks prozirnosti neba ( $K_t$ ) i atmosferski sadržaj vode koja se može istaložiti ( $W$ ). Ove varijable se odabiru na temelju njihovog značajnog utjecaja na spektar Sunčevog zračenja. Relativno ih je jednostavno mjeriti ili izračunati, međutim pružaju ograničene informacije o cjelokupnom obliku spektra.

S druge strane, vrijednosti izvedene izravno iz spektra izračunavaju se direktno iz mjerenih ili modeliranih podataka o spektralnom zračenju. One pružaju detaljnije informacije o obliku spektra. Glavni primjer je prosječna energija fotona ( $APE$ ), koja predstavlja srednju energiju fotona unutar razmatranog pojasa valnih duljina. Viša vrijednost  $APE$  ukazuje na spektar pomaknut prema plavom dijelu spektra, dok niža vrijednost  $APE$  ukazuje na spektar pomaknut prema crvenom dijelu spektra. Ove vrijednosti mogu preciznije karakterizirati spektralne učinke u usporedbi sa zamjenskim varijablama. Međutim, zahtijevaju mjerenja ili modeliranje spektralnog zračenja, što je složenije od zamjenskih varijabli.

Ukratko, zamjenske varijable su jednostavniji okolišni parametri koji se koriste za neizravno predstavljanje spektra, dok vrijednosti izvedene izravno iz spektra pružaju detaljnije spektralne informacije, ali zahtijevaju složenija mjerenja ili modeliranje. Članci sugeriraju da izravno izvedene vrijednosti poput  $APE$  mogu omogućiti preciznije modeliranje spektralnih učinaka na performanse FN sustava u usporedbi s pristupima koji koriste zamjenske varijable.

### 3.4.1 Masa zraka

Masa zraka ( $AM$ ) je mjera optičkog puta koji direktno Sunčevo zračenje prelazi kroz atmosferu, izražena kao omjer tog puta i vertikalnog puta do zenita. To je jedna od najčešće korištenih zamjenskih varijabli za karakterizaciju spektra Sunčevog zračenja. Povećanjem  $AM$  dolazi do većeg filtriranja i raspršivanja Sunčevog zračenja u atmosferi, što općenito smanjuje njegov intenzitet, posebice u vidljivom dijelu spektra ključnom za rad FN ćelija. Veće vrijednosti  $AM$  izraženije prigušuju kraće valne duljine, mijenjajući tako spektralnu raspodjelu zračenja koje

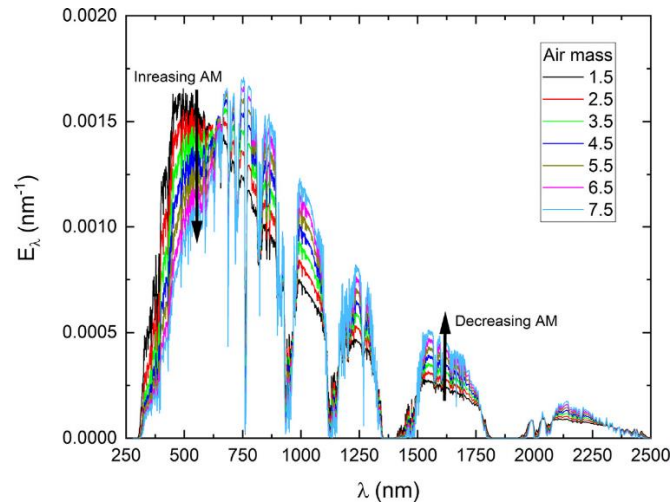
upada na površinu FN ćelija. Utjecaj  $AM$  na učinkovitost FN ćelija varira ovisno o tipu FN ćelija, pri čemu neki tipovi poput a-Si FN ćelija pokazuju bolje performanse pri manjim vrijednostima  $AM$ . Optimalan rad FN ćelija postiže se oko sunčanog podneva kada je Sunce u najvišoj točki na nebu i  $AM$  najmanja, što objašnjava dnevne i sezonske varijacije u proizvodnji električne energije iz FN sustava. Ova korelacija između  $AM$  i promjene u spektru čini je korisnim indikatorom za modeliranje spektralnih učinaka na FN ćelije [45], [46], [47].

Istraživanja su pokazala da varijacije  $AM$  između 1.0 i 5.0 mogu rezultirati oscilacijama performansi do 5% za c-Si ćelije i preko 5% za CdTe ćelije [48]. Međutim,  $AM$  sama po sebi ne uzima u obzir učinke difuznog zračenja i drugih atmosferskih varijabli, što može ograničiti njenu točnost u određenim uvjetima, posebno u oblačnim ili zagađenim okruženjima. Naime, vedro nebo omogućuje postojanost spektra, gdje su promjene uglavnom uzrokovane variranjem  $AM$  tijekom dana, što rezultira stabilnom vezom između  $AM$  i spektralnih efekata. Također, pri vedrom nebu dominira direktno Sunčevo zračenje, na koje  $AM$  funkcija primarno djeluje opisujući atmosferski utjecaj. Nasuprot tome, oblačno nebo ili prisutnost značajnih količina aerosola čini spektar varijabilnijim i teže predvidivim, uz povećanu dominaciju difuznog zračenja. To narušava odnos između  $AM$  i spektralnih efekata. Za precizno modeliranje performansi pri oblačnim uvjetima potrebni su složeniji modeli koji bi uzeli u obzir dodatne atmosferske faktore osim same  $AM$  [49].

Značajan doprinos području atmosferske optike dan je u radu u kojem je ispravljena pogreška u široko korištenoj tablici  $AM$  i revidirana pripadajuća aproksimacijska formula na način da je uzeta u obzir zakrivljenost Zemlje [50]:

$$AM = (\cos z + 0.50572(96.07995 - z)^{-1.6364})^{-1} \quad 3.3$$

Jasan pokazatelj da promjene  $AM$  značajno utječu na promjene u Sunčevom spektru prikazan je na slici 3.3. [51]. Krivulje spektralnog zračenja simulirane su od strane autora koristeći SMARTS, računalni program koji modelira prijenos Sunčevog zračenja kroz Zemljinu atmosferu. Njegova glavna svrha je izračunati spektralni intenzitet Sunčevog zračenja koje dopijeva do površine Zemlje, uzimajući u obzir različite atmosferske uvjete poput količine ozona, vodene pare, aerosola itd. Normalizacija je provedena dijeljenjem vrijednosti spektralnog zračenja za svaku valnu duljinu s ukupnim zračenjem, koje se izračunava integralom krivulje spektralnog zračenja po valnoj duljini.



Slika 3.3. Simulacija utjecaja AM na Sunčev spektar [51]

### 3.4.2 Indeks prozirnosti

Indeks prozirnosti ili indeks vedrine neba  $K_t$  definira se kao omjer globalnog horizontalnog zračenja izmjenog na površini Zemlje (engl. *global horizontal irradiance* - *GHI*) i ekstraterestričkog zračenja (engl. *global extraterrestrial irradiance* - *GEI*) na vrhu atmosfere. Ovaj parametar služi kao pokazatelj atmosferske prozirnosti i količine Sunčevog zračenja koje dopijeva do Zemljine površine [52]:

$$K_t = \frac{GHI}{GEI} \quad 3.4$$

Razumijevanje pokrivenosti oblacima važno je pri analizi spektra Sunčevog zračenja iz nekoliko razloga. Oblaci značajno utječu na prijenos Sunčevog zračenja kroz atmosferu, mijenjajući količinu direktnog i difuznog zračenja koje doseže tlo ili senzore. Raspršenje i apsorpcija zračenja od strane oblaka ovise o njihovom tipu, debljini, visini i pokrivenosti, što mijenja spektralnu raspodjelu zračenja. Povećana pokrivenost oblacima pojačava višestruko raspršenje između oblaka i površine, dodatno modificirajući opaženi spektar [53]. Učinci oblaka na Sunčev spektar ovise o valnoj duljini, pa poznavanje pokrivenosti oblacima pomaže u interpretaciji spektralnih značajki u različitim područjima spektra. Brze promjene pokrivenosti oblacima uzrokuju vremenske varijacije u opaženim spektrima koje treba uzeti u obzir. Također, točno poznavanje pokrivenosti oblacima bitno je za modeliranje prijenosa zračenja i interpretaciju izmjerenih spektara [54], [55]. Rad [56] pruža pregled empirijskih



istraživanja o utjecaju oblaka na Sunčevo zračenje koje dopijeva do Zemljine površine. Analiza pokazuje da je utjecaj oblaka na UV zračenje općenito manji nego na ukupno Sunčevo zračenje, ali postoji velika varijabilnost čak i za istu naoblaku zbog razlika u karakteristikama oblaka. Iako oblaci uglavnom smanjuju Sunčevo zračenje, u nekim slučajevima mogu ga i povećati. Prema studiji [27], FN ćelije temeljene na a-Si pokazuju povećanu učinkovitost od približno 2% u uvjetima jake naoblake (indeks prozirnosti  $K_t = 0,2$ ) u usporedbi s vedrim nebom ( $K_t = 0,8$ ). Ovo neobično svojstvo pripisuje se višem spektralnom odzivu a-Si tehnologije na kraćim valnim duljinama [24]. Prema istoj studiji, druge uobičajene FN tehnologije (m-Si, c-Si i CdTe) pokazuju smanjenu učinkovitost u oblačnim uvjetima. Prema radu [57] FN ćelije od hidratiziranog amorfno silicija (a-Si:H) pokazuju najbolje performanse u oblačnim uvjetima među svim vrstama FN ćelija.

Većina razmatranih studija temelji se na podacima iz sjevernih umjerenih geografskih širina, pa nedostaju podaci iz drugih područja. Autori preporučuju korištenje baza podataka od najmanje godinu dana, uz određena ograničenja i filtriranja podataka, te validaciju modela na neovisnom skupu. Zaključak je da su potrebna daljnja istraživanja ovisnosti utjecaja oblaka o različitim faktorima poput tipa oblaka, valne duljine zračenja i solarnog zenitnog kuta. Bitno je istaknuti da faktor  $K_t$  ima nekoliko ograničenja kao parametar za procjenu učinkovitosti FN sustava. Najvažnija ograničenja su da  $K_t$  ne pruža informacije o spektralnoj distribuciji Sunčevog zračenja, ne uzima u obzir temperaturu koja značajno utječe na učinkovitost ćelija, te ne razlikuje direktno i difuzno zračenje. Također,  $K_t$  se obično računa za horizontalnu površinu što može dovesti do odstupanja od stvarnih uvjeta na nagnutim FN modulima, a ne uzima u obzir ni lokalne mikroklimatske uvjete ni dugoročne trendove u atmosferskim uvjetima [58], [59]. Unatoč ovim ograničenjima,  $K_t$  je koristan alat za procjenu učinkovitosti FN sustava, posebno kada se koristi u kombinaciji s drugim parametrima poput temperature i spektralnih mjerenja. Razumijevanje njegovih ograničenja važno je za pravilnu interpretaciju podataka i optimizaciju FN sustava.

### 3.4.3 Omjer difuznog Sunčevog zračenja

Difuzno zračenje je dio Sunčevog zračenja koji je raspršen u atmosferi prije nego što dođe do Zemljine površine. Detaljna analiza komponenti Sunčevog zračenja i odnosa među njima dana je u radu [52]. Omjer difuznog Sunčevog zračenja, također poznat kao difuzni udio, definira se kao [60], [61]:

$$R_d = \frac{DHI}{GHI} \quad 3.5$$

Iako se faktor  $R_d$  rjeđe primjenjuje u istraživanjima FN sustava, njegova upotreba u kombinaciji s faktorom  $AM$  pokazala se korisnom u specifičnim studijama. Konkretno, u radu [62], ova kombinacija varijabli poslužila je za preciznije opisivanje spektra Sunčevog zračenja. Takav pristup omogućio je detaljniju analizu utjecaja spektralnih varijacija na učinkovitost i rad FN ćelija.

#### 3.4.4 Atmosferska taložna voda

Vodena para u atmosferi djeluje kao najefikasniji staklenički plin, održavajući prosječnu temperaturu Zemlje oko 15 °C. Atmosferska taložna vodena para (engl. *atmospheric precipitable water vapour* -  $W$ ) je komponenta Zemljinog klimatskog sustava, koja predstavlja ukupnu količinu vodene pare u atmosferi. Često se izražava kao dubina tekuće vode koja bi nastala kada bi se sva para kondenzirala i mjeri se u centimetrima.  $W$  je značajan faktor u prognoziranju vremena i klimatskom modeliranju zbog svog utjecaja na atmosfersku dinamiku i energetska ravnotežu. Otprilike 40-60% vodene pare koncentrirano je u sloju od površine do 850 hPa, dok se oko 90% nalazi između površine i 500 hPa, što naglašava njegovu koncentraciju blizu Zemljine površine. Prisutnost vodene pare količine  $W$  u atmosferi značajno utječe na apsorpciju IR zračenja, što može utjecati na primjene Sunčeve energije i klimatske studije [63].

Detaljna analiza o karakteristikama sadržaja  $W$  diljem svijeta predstavljena je u članku [64] u kojem ga autori istražuju koristeći podatke sa 192 GPS stanice i uspoređujući rezultate s podacima dobivenim iz radio-sondi. U članku [65] autori su razvili globalni skup podataka o taložnoj vodi u atmosferi, temeljen na mjerenjima pomoću GPS-a, s rezolucijom od dva sata između 1997. i 2004. godine, te su razvili tehniku za pretvaranje zenitnog kašnjenja puta u  $W$  uzimajući u obzir površinski tlak i srednju temperaturu atmosfere.

U slučaju nepostojanja mjerenih podataka  $W$  se lako može estimirati korištenjem sljedeće jednadžbe [66]:

$$W = 0,1H_v\rho_v \quad 3.6$$

gdje je  $H_v$  [km] prividna visinska skala vodene pare,  $\rho_v$  [ $\text{gm}^{-3}$ ] je gustoća vodene pare na površini, a koeficijent 0,1 je potreban za usklađivanje jedinica.  $H_v$  je funkcija temperature i izračunava se na sljedeći način:

$$H_v = 0,4976 + 1,5265\beta + \exp(13,6897\beta - 14,9188\beta^3) \quad 3.7$$

gdje je  $\beta=T/T_0$  i  $T_0 = 273,15$  K. Istovremeno,  $\rho_v$  je funkcija relativne vlažnosti ( $RH$ ), temperature,  $T$  [K], i zasićenog tlaka vodene pare,  $e_s$  [mbar], koji je funkcija temperature [67]:

$$\rho_v = 216,7 \cdot \frac{RH e_s}{T} \quad 3.8$$

$$e_s = \exp a_0 + a_1 T_0^{-1} + a_2 T_0^{-1} + a_3 T_0^{-1} \quad 3.9$$

Velik broj modela za estimaciju zasićenog tlaka vodene pare je opisan u radu [68]. Tabata je u radu [69] predložio jednostavnu kvadratnu formulu za izračunavanje tlaka zasićene vodene pare iznad tekuće vode, koja je posebno precizna u temperaturnom rasponu od 0-35°C te pruža srednju postotnu pogrešku od 0,17 % unutar navedenog temperaturnog raspona. Lowe je razvio polinom šestog reda [70] koristeći Čebiševljevo prilagođavanje za aproksimaciju tlaka zasićene vodene pare u rasponu od -50°C do 50°C. Ovaj polinom je određen da održava pogreške unutar 1% u cijelom primjenjivom rasponu. Langlois [71] je predložio racionalnu funkciju za aproksimaciju tlaka zasićene vodene pare, poboljšavajući računalnu učinkovitost uz održavanje točnosti. Ova racionalna aproksimacija značajno poboljšava brzinu izračuna kada se koristi u modelima koji zahtijevaju česte izračune tlaka zasićene vodene pare. Nešto drugačiji pristup primijenjen je u istraživanju [72] u kojem je analiziran odnos između količine vodene pare u atmosferi iznad oceana i temperature površine mora korištenjem podataka prikupljenih satelitskim mikrovalnim radiometrom. Prednost ovog pristupa je u minimizaciji odstupanja uzrokovana temperaturom površine mora i kapljicama vode u oblacima koristeći temperaturne razlike između susjednih frekvencija. Ove formule pružaju točne procjene tlaka zasićene vodene pare u različitim temperaturnim rasponima, istovremeno balansirajući računalnu učinkovitost, što ih čini pogodnima za različite meteorološke primjene.

U literaturi je istaknuta značajna korelacija između varijacije  $W$  i performansi CdTe. Bitno je spomenuti članak [28] koji se bavi važnim aspektima učinkovitosti FN sustava baziranih na CdTe. Analiziran je utjecaj spektralnih promjena Sunčevog zračenja na performanse FN ćelija od CdTe u različitim klimatskim uvjetima i godišnjim dobima. Koncept koji je uveden je faktor neusklađenosti spektra (engl. *spectral mismatch factor* -  $M$ ), koji kvantificira odstupanje učinkovitosti od nominalne vrijednosti zbog varijacija u Sunčevom spektru. Istraživanje pokazuje da CdTe sustavi općenito imaju poboljšane performanse u kasno ljeto i ranu jesen, kada je atmosferski sadržaj vode veći, dok im učinkovitost opada zimi.

#### 3.4.5 Optička dubina aerosola

Optička dubina aerosola (engl. *Aerosol optical depth* -  $AOD$ ) ima presudnu ulogu u opisivanju kako atmosferski aerosoli utječu na Sunčevo zračenje i performanse FN sustava. Definirana kao bezdimenzijska mjera gušenja izravnog zračenja zbog aerosola [73],  $AOD$  se može procijeniti pomoću Ångströmove formule zamućenosti, koja povezuje  $AOD$  s valnom duljinom i Ångströmovim eksponentom [74]. Aerosoli mogu značajno utjecati na spektralnu distribuciju Sunčevog zračenja, posebno u urbanim i industrijskim područjima s visokim razinama onečišćenja zraka [75]. Atmosferski aerosoli, koji se sastoje od suspendiranih čestica različitog sastava i veličine [76], prvenstveno utječu na UV-vidljivi dio spektra, sa zanemarivim utjecajem iznad valne duljine od 1  $\mu\text{m}$  [77], [78], [79]. Nedavna istraživanja su pokazala da  $AOD$  može imati značajan utjecaj na učinkovitost FN sustava, posebno u područjima s visokim razinama atmosferskog aerosola [80], [81]. Ova spektralna ovisnost čini ovaj faktor posebno relevantnim za FN tehnologije temeljene na materijalima sa većim iznosom širine zabranjenog pojasa poput CdTe i PSC [82]. Istraživanja su pokazala da spektralni pomaci uzrokovani  $AOD$  mogu promijeniti učinkovitost koncentrirajućih trostruko spojenih FN ćelija za približno 4% [83]. Štoviše, dugoročne promjene u  $AOD$  mogu imati značajan utjecaj na procjene Sunčeve energije i planiranje FN projekata [84]. Primijećeno je i da ekstremni događaji koji uzrokuju povišene razine  $AOD$ , poput šumskih požara i smoga, mogu smanjiti proizvodnju FN energije i do 40% [85], [86]. Složena priroda aerosola i njihova prostorno-vremenska varijabilnost zahtijevaju razvoj globalne mreže praćenja i satelitska promatranja kako bi se osigurali točni podaci o  $AOD$  za modeliranje i predviđanje učinkovitosti FN sustava [87], [88]. Razumijevanje i kvantificiranje učinaka  $AOD$  važno je za poboljšanje točnosti funkcija spektralne korekcije i optimizaciju dizajna i rada FN sustava u različitim atmosferskim uvjetima.

### 3.4.6 Prosječna energija fotona

Prosječna energija fotona (engl. *average photon energy - APE*) je faktor koji se često koristi u akademskoj zajednici za karakterizaciju spektralne distribucije Sunčevog zračenja pomoću jedne vrijednosti. Pruža kvantitativnu mjeru o tome je li Sunčev spektar pomaknut prema kraćim ili dužim valnim duljinama u usporedbi s referentnim spektrom. Više vrijednosti *APE* ( $>1,88$  eV) ukazuju na spektar bogat plavom bojom, dok niže vrijednosti ( $<1,88$  eV) ukazuju na spektar bogat crvenom bojom. *APE* može varirati ovisno o čimbenicima poput lokacije, doba dana, godišnjeg doba i atmosferskih uvjeta.

Za razliku od drugih parametara koji su dosad opisani, prosječna energija fotona nije okolišna varijabla koja utječe na spektar. *APE* pruža izravnu kvantitativnu karakterizaciju konačne spektralne raspodjele nakon što je već bila pod utjecajem svih relevantnih okolišnih parametara u promatranom području, bilo da se radi o *AM*, oblacima, vodenoj pari *W* ili bilo čemu drugom. To je u suprotnosti s tradicionalnim pristupima koji uzimaju jedan ili dva faktora koji mogu utjecati na spektar i zatim ih koriste kao zamjenu za ukupni spektralni utjecaj na FN izlaz. Po definiciji, *APE* bi trebao sadržavati informacije o svim parametrima koji utječu na spektar jer je numerička reprezentacija izmjerene spektralne raspodjele nakon što su fotoni u toj raspodjeli već bili pod utjecajem svih okolišnih fenomena. Primjena ovog parametra za karakterizaciju izmjerenog spektralnog zračenja na površini Zemlje predložena je u radu [89]. Izračunava se dijeljenjem integriranog spektralnog ozračenja s integriranom gustoćom toka fotona preko određenog raspona valnih duljina:

$$APE = \frac{\int_a^b E(\lambda) d\lambda}{q \int_a^b \Phi(\lambda) d\lambda} \quad 3.10$$

gdje je  $E(\lambda)$  spektralno ozračenje,  $\Phi(\lambda)$  je spektralna gustoća toka fotona,  $q$  je naboj elektrona,  $a$  i  $b$  su donja i gornja granica valnih duljina razmatranog valnog područja.

Iako je *APE* stekao popularnost u ovom području i često se u radovima koristi za predstavljanje spektra Sunčevog zračenja [90], [91], [92], [93], [94], njegova učinkovitost kao jedinog parametra kojim se opisuje oblik spektra dovedena je u pitanje. Temeljni problem leži u potencijalnom nedostatku bijekcije između *APE* vrijednosti i jedinstvenih spektralnih

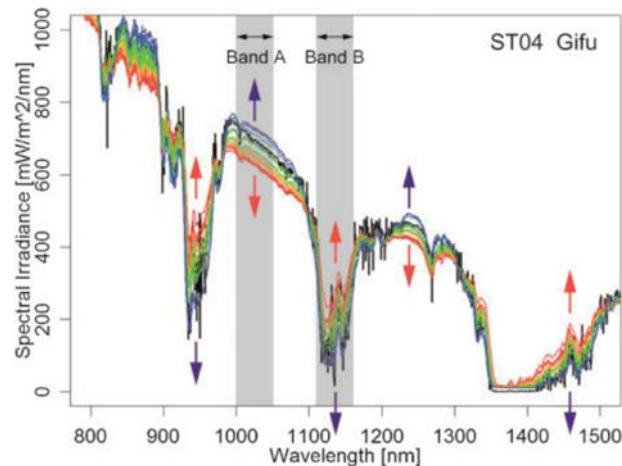
distribucija. Teoretski je moguće da dva različita oblika spektra daju identične *APE* vrijednosti. To se može dogoditi kada se smanjenje spektralne ozračenosti u jednom rasponu valnih duljina kompenzira povećanjem u drugom, što rezultira istom prosječnom energijom po fotonu unatoč različitim ukupnim spektralnim profilima.

Nejedinstveni odnos između *APE* i oblika spektra izaziva zabrinutost oko njegove pouzdanosti kao samostalne metrike za analizu FN učinkovitosti. Ako *APE* ne može dosljedno i jedinstveno karakterizirati spektre u rasponu valnih duljina relevantnom za FN primjene, njegova korisnost u predviđanjima i usporedbama učinkovitosti može biti značajno ugrožena. U radovima [95], [96], [97] uzima se da *APE* sadrži informacije o dominantnim okolišnim uvjetima koji utječu na rad FN sustava i da je stoga pomoću njega moguće učinkovito karakterizirati oblik spektralne raspodjele upadnog zračenja. Rad [98] verificira jedinstvenost ovog parametra u opisivanju spektra Sunčevog zračenja i proučava njegov utjecaj na rad različitih tipova FN ćelija. Pokazano je da je *APE* koristan bijektivni indeks za opisivanje spektralne raspodjele zračenja pri evaluaciji učinkovitosti FN ćelija u realnim uvjetima rada. Međutim, treba napomenuti da je jedinstvenost *APE* potvrđena samo za specifičnu lokaciju mjerenja korištenu u ovoj studiji. Za uspostavljanje univerzalne primjenjivosti ovog pristupa potrebne su daljnje analize na različitim lokacijama i u različitim klimatskim uvjetima. Opširnija analiza korištenjem iste metodologije odrađena je u [99] u kojem su autori analizirali dvogodišnje podatke spektralnog zračenja prikupljene u Španjolskoj u gradovima Jaén i Madrid. Rezultati pokazuju da se *APE* može smatrati približno jedinstvenom karakteristikom spektralne raspodjele u središnjem dijelu spektra (450-900 nm) na ovim lokacijama. Međutim, izvan tog raspona (350-450 nm i 900-1050 nm) postoji veća varijabilnost koja se može objasniti eksperimentalnom nesigurnošću i atmosferskim utjecajima, posebno aerosolima i vodenom parom. Autori zaključuju da *APE* ne može biti potpuno jedinstvena karakteristika cijelog spektra, ali može biti korisna aproksimacija za središnji dio spektra u sličnim klimatskim uvjetima.

#### 3.4.7 Apsorpcijski pojas

Cilja rada [100] bio je poboljšati preciznost i točnost procjene utjecaja Sunčevog spektra na performanse FN modula uvođenjem dodatnih indeksa uz već korištenu *APE*. Istraživanje je provedeno koristeći podatke o Sunčevom spektru prikupljene na četiri lokacije u Japanu tijekom trogodišnjeg razdoblja. Metodologija je uključivala odabir Sunčevih spektara čiji su integrirani spektralni intenzitet (engl. *integrated spectral irradiance* - *ISI*) i *APE* bili ekvivalentni

standardnom AM 1.5 spektru. Dodatno je uveden novi indeks koji definira spektralni intenzitet u atmosferskom prozoru ili dubinu pojasa apsorpcije vode. Analiza je pokazala da su oblici odabranih Sunčevih spektara slični standardnom AM 1.5 spektru, iako postoje manje razlike u spektralnim intenzitetima. Utvrđena je snažna negativna korelacija između prosječnog intenziteta u atmosferskom prozoru (pojas A) i pojasu apsorpcije vode (pojas B) što je prikazano na slici 3.4.



Slika 3.4. Dio promatranog spektra u rasponu od 800 nm do 1500 nm

Rezultati sugeriraju da mala razlika između odabranog Sunčevog spektra i standardnog AM 1.5 spektra potječe iz dubina pojasa apsorpcije vode. Stoga se sugerira korištenje tog dodatnog indeksa prosječnog spektralnog intenziteta pojasa A u kombinaciji s *APE* čime se postiže značajno poboljšanje točnosti procjene utjecaja Sunčevog spektra na performanse FN ćelija. Dodatni indeks prosječnog spektralnog ozračenja pojasa A definiran je kao:

$$\varepsilon = \int_a^b E_\lambda d\lambda \quad 3.11$$

gdje je  $E_\lambda$  spektralno ozračenje, a  $\lambda$  je valna duljina.

### 3.5. Opisivanje promjena performansi FN sustava uzrokovanih spektrom

Prethodno poglavlje opisuje neke od parametara koji se mogu koristiti za karakterizaciju proizvoljnog Sunčevog spektra. Međutim, za izvođenje funkcije spektralne korekcije i analizu

utjecaja spektra na performanse FN ćelija, potrebno je imati i parametar koji karakterizira isključivo spektralni učinak na FN performanse, bez utjecaja drugih parametara poput ozračenja, temperature i slično. U ovom poglavlju opisano je nekoliko takvih parametara koji omogućuju izoliranje čistog spektralnog utjecaja na rad FN ćelija. Ovi parametri su bitni za razvoj preciznih modela koji mogu predvidjeti kako će promjene u Sunčevom spektru utjecati na izlaznu snagu i učinkovitost FN ćelija, neovisno o drugim okolišnim čimbenicima.

### 3.5.1 (Težinski) korisni udio

Korisni udio (engl. *useful fraction* - *UF*) predstavlja omjer zračenja koje pada unutar spektralnog odziva FN ćelije i ukupnog dostupnog zračenja. Ovaj koncept je prvi put predložen u radu [101] pod nazivom "iskoristivi spektar", ali je s vremenom postao poznat kao korisni udio. *UF* se izračunava prema sljedećoj formuli [101], [102]:

$$UF = \frac{1}{G} \int_0^{\lambda(E_g)} E_\lambda d\lambda \quad 3.12$$

gdje je  $G$  ukupno ozračenje,  $\lambda(E_g)$  valna duljina koja odgovara širini zabranjenog pojasa FN ćelije i  $E_\lambda$  spektralno ozračenje. Ova formula izračunava omjer zračenja koje pada unutar spektralnog odziva FN uređaja i ukupnog dostupnog zračenja. Integral se računa od nule do valne duljine koja odgovara energiji zabranjenog pojasa uređaja. Iako je *UF* korišten u nekoliko ranijih istraživanja [103], [104], [105], [106], njegovo glavno ograničenje je da pretpostavlja maksimalni *SR* preko svih valnih duljina, što nije realno. Također, *UF* ne uzima u obzir stvarni *SR* specifične FN ćelije [107]. Za preciznije modeliranje spektralnog utjecaja, razvijen je težinski korisni udio (engl. *weighted useful fraction* - *WUF*). Ovaj sofisticiraniji pristup integrira *SR* FN ćelije za svaku pojedinu valnu duljinu zračenja. Matematički izraz kojim se izračunava *WUF*, koji je predložen u radu [108] te dodatno razrađen u [106], glasi:

$$WUF = \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} E_\lambda SR_\lambda d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} E_\lambda d\lambda} \quad 3.13$$

gdje je  $E_\lambda$  spektralno ozračenje,  $SR_\lambda$  spektralni odziv ćelija, a  $\lambda_{min}$  i  $\lambda_{max}$  predstavljaju granice spektralnog odziva uređaja. Budući da *SR* ćelija nikada nije 100% na bilo kojoj valnoj duljini,



$UF$  je uvijek veći od  $WUF$ . Precjenjivanje korisnog zračenja pomoću  $UF$  dovelo bi do precjenjivanja izlazne snage FN sustava. Zajedničko ograničenje  $UF$  i  $WUF$  je potreba za poznavanjem  $SR$  ćelija, što se može dobiti samo kroz složeno mjerenje specijaliziranom opremom [109].  $WUF$  pruža precizniju procjenu korisnog zračenja u usporedbi s  $UF$ , jer uzima u obzir stvarne karakteristike spektralnog odziva ćelija. Međutim, složenost mjerenja potrebnih za izračun  $WUF$  ograničava njegovu široku primjenu u praksi.

### 3.5.2 Normalizirana struja kratkog spoja

Normalizirana struja kratkog spoja ( $I_{scn}$ ) predstavlja važan parametar u analizi učinkovitosti FN ćelija. Ovaj koncept omogućuje usporedbu različitih FN tehnologija neovisno o njihovoj veličini ili specifičnim uvjetima testiranja. Struja kratkog spoja ( $I_{sc}$ ) definira se kao struja koja teče kroz FN ćeliju kada je napon na njezinim stezaljkama jednak nuli i podložna je učincima mnogih različitih varijabli, uključujući spektar. Među mnogobrojnim čimbenicima koji utječu na  $I_{sc}$ , dva se ističu kao posebno značajna: ozračenje i radna temperatura FN ćelije. Ovi nespektralni utjecaji predstavljaju glavne modulatore rada FN sustava. Međutim, kada se njihov učinak precizno kvantificira i eliminira iz mjerenja  $I_{sc}$ , preostale varijacije u radu mogu se pripisati promjenama u spektralnoj distribuciji upadnog Sunčevog zračenja u odnosu na standardni referentni spektar. Ovaj pristup omogućuje detaljnu analizu spektralnih učinaka, no važno je napomenuti da se pri karakterizaciji ispitivanog uređaja mogu pojaviti i drugi značajni faktori. Primjerice, kut pod kojim svjetlost upada na površinu FN ćelija može imati znatan utjecaj na njegovu učinkovitost. Stoga se u analizi rada FN sustava moraju uzeti u obzir i ovi dodatni parametri, čime se postiže preciznija slika stvarnog ponašanja uređaja u realnim uvjetima rada. Proces normalizacije opisan u radu [110] je sljedeći:  $I_{sc}$ , koja se mjeri pri proizvoljnom ozračenju i temperaturi, prevodi se na referentnu temperaturu,  $T_r$ , i referentno zračenje,  $G_0$ , kako bi se dobila intermedijarna vrijednost struje kratkog spoja,  $I'_{sc}$ :

$$I'_{sc} = \frac{I_{sc}}{1 + \hat{\alpha}_{I_{sc}}(T_c - T_r)} \left[ \frac{G_0}{G_{poa}} \right] \quad 3.14$$

gdje je  $\hat{\alpha}_{I_{sc}}$  [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ] temperaturni koeficijent struje kratkog spoja,  $T_c$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] izmjerena (ili modelirana) temperatura ćelije, a  $G_{poa}$  [ $\text{Wm}^{-2}$ ] izmjereno (ili modelirano) zračenje u ravnini FN niza. Drugi učinci također se mogu ukloniti iz  $I_{sc}$  pri izračunu  $I'_{sc}$ , kao što je na primjer kut

upada. Normalizirana struja kratkog spoja,  $I_{scn}$ , zatim se nalazi dijeljenjem  $I'_{sc}$  s referentnom strujom kratkog spoja,  $I_{sc0}$ , koja je izmjerena pri STC:

$$I_{scn} = \frac{I'_{sc}}{I_{sc0}} \quad 3.15$$

Princip normalizacije je standardna matematička tehnika te je upotrijebljen i u Sandia modelu (engl. *Sandia Array Performance Model - SAPM*) [111], ali i u drugoj literaturi povezanoj sa SCF. Tako rad [112] predstavlja jednostavan empirijski model za procjenu utjecaja varijacija Sunčevog spektra na performanse FN ćelija, pri čemu se model temelji na pretpostavci da promjene u spektru utječu na struju kratkog spoja ćelija i time na izlaznu snagu. Studija [113] ispituje sezonsku varijaciju u Sunčevom spektru i njezin utjecaj na  $I_{sc}$  i performanse tri FN tehnologije (c-Si, a-Si i CdTe) za mjerenja provedena u gradu Gurgaonu u Indiji, radi se o vlažnoj suptropskoj klimi s velikim utjecajem monsunu. Rad [114] analizira različite metode za karakterizaciju utjecaja Sunčevog spektra na performanse FN uređaja, s naglaskom na modele koji koriste faktore  $APE$  i  $W$  za poboljšanje točnosti predviđanja  $I_{sc}$  i izlazne snage FN sustava.

### 3.5.3 Faktor neusklađenosti spektra

Faktor neusklađenosti spektra ( $M$ ) je važan parametar u mjerenjima FN sustava koji se koristi za objašnjavanje odstupanja između spektralnog odziva ispitivanog uređaja i referentne ćelije, kao i razlika između spektra simulatora i standardnog Sunčevog spektra. Ovaj faktor je neophodan za preciznu kalibraciju i procjenu performansi FN ćelija.  $M$  se definira kao omjer  $I_{sc}$  testirane ćelije pri STC i njezine  $I_{sc}$  u simuliranim uvjetima, normaliziran istim omjerom za referentnu ćeliju, što se matematički izražava kao [115]:

$$M = \frac{\int E_{\lambda,0} SR_{\lambda,0} d\lambda \int E_{\lambda,meas} SR_{\lambda,sample} d\lambda}{\int E_{\lambda,meas} SR_{\lambda,0} d\lambda \int E_{\lambda,0} SR_{\lambda,sample} d\lambda} \quad 3.16$$

gdje prvi indeks,  $\lambda$ , označava funkcionalnu ovisnost, a drugi,  $ref$ ,  $meas$  ili  $sample$  označava redom referentnu vrijednost, izmjerenu vrijednost ili vrijednost uzorka. Ova korekcija je ključna za kalibraciju FN ćelija i modula, preciznu usporedbu različitih FN tehnologija i procjenu performansi u različitim spektralnim uvjetima. Na primjer, pri mjerenju U-I karakteristika FN ćelije, svaka točka struje treba biti korigirana faktorom  $M$  prije određivanja

električnih parametara kojima se opisuju performanse. Prednosti korištenja ovog faktora uključuju poboljšanu točnost mjerenja performansi FN ćelija, standardizaciju koja omogućuje dosljednu usporedbu performansi FN ćelija u različitim laboratorijima i uvjetima ispitivanja, neovisnost o tehnologiji izrade koja omogućuje primjenu na različite FN tehnologije, od tradicionalnih silicijskih ćelija do novih materijala poput perovskita, te uzimanje u obzir varijacija atmosferskih uvjeta koje utječu na Sunčev spektar, poput *AOD* i vlažnosti [116], [117]. Međutim, postoje i izazovi povezani s korištenjem ovog faktora. Izračun zahtijeva detaljna mjerenja *SR* i testirane i referentne ćelije, kao i precizne podatke o spektru Sunčevog zračenja za simulator i standardne spektre. Za precizno mjerenje spektra Sunčevog zračenja solarnih simulatora potrebna je specijalizirana oprema, poput spektrometra. Proces mjerenja *SR* i izračuna faktora *M* može biti dugotrajan, posebno kada se radi s više uređaja ili tehnologija. Osim toga, *M* može varirati s atmosferskim uvjetima, dobom dana i lokacijom, što otežava primjenu jedinstvenog faktora korekcije za vanjska mjerenja. Unatoč izazovima, faktor *M* ostaje nezamjenjiv alat u FN istraživanju i industriji. Značajno poboljšava točnost mjerenja FN ćelija i omogućuje pravedne usporedbe između različitih tehnologija i uvjeta ispitivanja. Kako se FN industrija nastavlja razvijati s novim materijalima i arhitekturama ćelija, važnost precizne korekcije spektralne neusklađenosti vjerojatno će rasti, potičući daljnja istraživanja i napore standardizacije u ovom području.

## 4. FUNKCIJE SPEKTRALNE KOREKCIJE

U prethodnim poglavljima detaljno su razmotrene zamjenske varijable i vrijednosti izvedene izravno iz Sunčevog spektra, koje čine temelj za izračun spektralnih korekcijskih funkcija (SCF). Performanse bilo koje FN ćelije obično su poznate za skup STC, koji uključuju referentni spektar. Kako bi se ispravila razlika u performansama zbog spektra pod realnim radnim uvjetima, koristi se SCF. SCF se temelji ili na zamjenskim varijablama koje se koriste za predstavljanje spektra, ili na vrijednostima izvedenim izravno iz Sunčevog spektra.

Kako bi se uzeo u obzir utjecaj spektra u FN performansama, koristi se SCF za prevođenje izlaza FN sustava poznatog pri STC na performanse pod proizvoljnim uvjetima. Takve funkcije sastoje se od dva dijela: jedan dio je matematička karakterizacija Sunčevog spektra, dok je drugi karakterizacija performansi FN sustava pod utjecajem varijacija u Sunčevom spektru.

### 4.1. AM funkcija

Znanstveni rad [118] prvi je uveo AM funkciju koja opisuje spektralni utjecaj kao funkciju apsolutne mase zraka ( $AM_a$ ). Ova funkcija se može izraziti kao:

$$f_1(AM_a) = \frac{I_{sct}}{E^*} \cdot \frac{E_0^*}{I_{sct0}} \quad 4.1$$

gdje je  $I_{sct}$  izmjerena struja kratkog spoja ćelija,  $E^*$  ukupno ozračenje izmjereno piranometrom,  $E_0^*$  referentno ozračenje ( $1000 \text{ W/m}^2$ ), a  $I_{sct0}$  struja kratkog spoja pri STC. AM funkcija se pokazala relativno konzistentnom na različitim lokacijama pod vedrim nebom, što je čini vrijednim alatom za karakterizaciju spektralnog utjecaja. U prošlom poglavlju spomenuti SAPM koristi apsolutnu masu zraka ( $AM_a$ ) koja je korigirana za atmosferski tlak. Funkcija za spektralni gubitak u SAPM modelu ( $f_1(AM_a)$ ) koristi  $AM_a$  kao ulaz.  $AM_a$  se računa korigirajući relativnu masu zraka s obzirom na atmosferski tlak, što uzima u obzir efekte nadmorske visine i vremenskih uvjeta. Formula za  $AM_a$  u SAPM modelu je:

$$AM_a = AM \cdot \frac{P}{P_0} \quad 4.2$$

gdje je  $AM_a$  apsolutna masa zraka,  $AM$  relativna masa zraka koja je izračunata korištenjem modela koji je predložen u radu [50],  $P$  atmosferski tlak na lokaciji,  $P_0$  - standardni atmosferski tlak na razini mora (101,325 kPa). Zatim se  $AM_a$  koristi u polinomnoj funkciji četvrtog stupnja  $f_1(AM_a)$  za izračun spektralnog faktora:

$$I_{scn} = a_0 + a_1 \cdot AM_a + a_2 \cdot (AM_a)^2 + a_3 \cdot (AM_a)^3 + a_4 \cdot (AM_a)^4 \quad 4.3$$

gdje su  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  i  $a_4$  empirijski određeni koeficijenti. Javno dostupna baza podataka svih SAPM koeficijenata za razne FN tehnologije razvijena je od strane Sandia nacionalnog laboratorija (engl. *Sandia National Laboratory - SNL*) i može se pronaći u PVLIB Python biblioteci [119], a postoji i vodič za empirijsko određivanje koeficijenata [111].

#### 4.2. $W$ i $AM$ - $W$ funkcije

Autori studije [28] predstavili su faktor neusklađenosti spektra  $M$  kao eksponencijalnu funkciju  $W$ :

$$M_{CdTe} = 0.632 + 0.134 \cdot \exp(0.976(W + 0.05)^{0.079}) \quad 4.4$$

Njihov fokus na CdTe tehnologiju proizašao je iz prethodnog otkrića da  $W$  ima dominantan utjecaj na performanse ove specifične FN tehnologije. Korišten je SMARTS (engl. *Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine*) model za predviđanje spektra pod vedrim nebom. Ulazni podaci za model su dobiveni iz TMY3 (engl. *Typical Meteorological Year 3*) datoteka. Predviđanja modela su uspoređena sa stvarnim performansama CdTe FN sustava u različitim klimatskim uvjetima. Pokazana je dobra korelacija između predviđenog  $M$  faktora i mjerenog indeksa performansi sustava (engl. *power performance indeks - PPI*). Isti autori su 2015. godine objavili nastavak svog originalnog rada [120], u kojem su analizirali spektralne efekte na novu generaciju CdTe ćelija proizvođača „First Solar“. Koristili su istu parametrizaciju  $M$  faktora kao funkciju  $W$ , ali su je prilagodili za nove ćelije:

$$M_{CdTe} = a + b \cdot \exp(c(W + d)^e) \quad 4.5$$

gdje su  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  i  $e$  konstante specifične za određenu generaciju CdTe ćelija.

Neki radovi poput [121] dokazali su ograničenu primjenjivost spomenutog modela na druge FN tehnologije. Ovi nalazi sugeriraju da, iako je navedeni model koristan za CdTe ćelije, njegova ograničena primjenjivost na druge tehnologije vjerojatno je razlog zašto nije ušao u širu upotrebu u industriji FN sustava te je modificirani model [122] koji uzima u obzir i  $AM_a$  i  $W$  zamijenio ovaj i ostale pristupe koji koriste jednu varijablu. Model se može primijeniti i na CdTe i na c-Si ćelije, dok su prethodni modeli bili ograničeni na jednu tehnologiju. Njegova relativno jednostavna funkcionalna forma omogućuje laku integraciju u standardne alate za simulaciju FN sustava, čineći ga praktičnim rješenjem za široku primjenu u industriji. Model koristi koeficijente specifične za točno određenu FN ćeliju temeljene na krivulji kvantne učinkovitosti ćelija, omogućujući preciznije predviđanje za različite tipove ćelija.

$$M = b_0 + b_1 \cdot AM_a + b_2 \cdot W + b_3 \cdot \sqrt{AM_a} + b_4 \cdot \sqrt{W} + b_5 \cdot \frac{AM_a}{\sqrt{W}} \quad 4.6$$

gdje je  $M$  faktor neusklađenosti spektra,  $AM_a$  je apsolutna masa zraka,  $W$  je taložna voda, a  $b_0$ - $b_5$  su koeficijenti specifični za FN ćeliju. Model kao ulazne podatke koristi uobičajeno dostupne meteorološke podatke ( $AM$  i  $W$ ), što ga čini praktičnim za široku upotrebu.

### 4.3. Funkcije koje su kombinacije $AM$ i drugih faktora

Model nazvan PVSPEC predstavljen je u radu [123]. Ovaj model koristi  $K_t$  i  $AM_a$  kao ulazne veličine te je razvijen i testiran na podacima s osam lokacija diljem svijeta za šest različitih FN tehnologija. PVSPEC model uspoređen je s postojećim modelima tvrtke First Solar i Zajedničkog istraživačkog centra Europske komisije (engl. *Joint Research Centre - JRC*). Rezultati pokazuju da PVSPEC nadmašuje ove modele u točnosti, s prosječnom srednjom kvadratnom pogreškom od 3,2% i prosječnom apsolutnom pogreškom od 0,8% na dugoročnom spektralnom učinku.

Rad [112] predstavlja jednostavan empirijski model za procjenu utjecaja Sunčevog spektra na performanse FN ćelija. Autori polaze od pretpostavke da promjene u spektru prvenstveno utječu na  $I_{sc}$  ćelija, a time i na izlaznu snagu. Model se temelji na dva parametra –  $K_t$  i  $AM$ . Testiran je na podacima s dvije lokacije u Italiji za c-Si i CdTe ćelije. Rezultati pokazuju da spektralne varijacije na razmatranom području dovode do povećanja energetskog prinosa od 0,4% za c-Si i 1,5% za CdTe u odnosu na STC.

Prije navedeni modeli spektralne korekcije često se oslanjaju na ograničen broj zamjenskih varijabli kao zamjenu za cjelokupni spektar. Međutim, s obzirom na složenost atmosferskih uvjeta koji utječu na Sunčev spektar, takvi pojednostavljeni pristupi neizbježno zanemaruju utjecaj nekih važnih čimbenika. To može dovesti do značajnih netočnosti pri primjeni ovih modela u različitim klimatskim zonama diljem svijeta. Zbog geografske varijacije spektra Sunčeva zračenja i činjenice da relativni utjecaj pojedinih atmosferskih parametara na Sunčev spektar može znatno varirati ovisno o lokalnim klimatskim uvjetima, nužno je razmatrati veći broj parametara pri analizi. Članak [124] predstavlja metodu za spektralnu korekciju u koncentrirajućim FN sustavima, uzimajući u obzir  $AM$ ,  $AOD$  i  $W$ . Autori predlažu set analitičkih jednadžbi za izračun faktora spektralne korekcije za CPV. Za generiranje spektara za različite atmosferske uvjete, korišten je SMARTS2, novija verzija programa SMARTS s boljom spektralnom rezolucijom u odnosu na originalni program, koja uzima u obzir i dušikov dioksid i modelira njegovu apsorpciju u UV i vidljivom dijelu spektra, ima poboljšan izračun difuznog zračenja i uključuje koeficijente apsorpcije temeljene na najnovijim spektroskopskim podacima. Razvijene su jednadžbe za svaku podćeliju trostruke višespojne FN ćelije, zasebno razmatrajući učinke  $AM$ ,  $AOD$  i  $W$ . Metoda je validirana korištenjem tri mjeseca eksperimentalnih podataka prikupljenih u Jaénu, Španjolska. Rezultati su uspoređeni s izmjerenim spektralnim faktorima, pokazujući dobro slaganje (koeficijent determinacije  $R^2$  iznosi 0,97). Predložena metoda uspoređena je s postojećim Sandia Labs i First Solar modelima. Ova metoda pokazuje manje pogreške, s korijenom srednje kvadratne pogreške (engl. *root mean square error - RMSE*) od 0,8% u usporedbi s 2,3% za druge metode.

Na ovaj rad nadovezao se [125] u kojem je predstavljen novi skup analitičkih jednadžbi za modeliranje spektralnih efekata za šest različitih FN tehnologija (a-Si, PSC, CdTe, p-Si, c-Si, CIGS) korištenjem istih zamjenskih varijabli i SMARTS2 modelom za generiranje sintetičkih spektara kao u [124]. Validacija modela provedena je korištenjem 12-mjesečnih eksperimentalnih podataka prikupljenih u Jaénu, Španjolska, što značajno povećava pouzdanost i primjenjivost razvijenog modela u realnim uvjetima. Rezultati pokazuju izvanrednu preciznost predloženog pristupa, s  $R^2$  između 0.87 i 0.92 za različite tehnologije. Nadalje, RMSE ostaje ispod 0,85% za sve ispitivane tehnologije, demonstrirajući visoku točnost predviđanja.

U radu [62] predstavljen je model za procjenu utjecaja Sunčevog spektra na  $I_{sc}$  FN ćelija nazvan funkcija kumulativne distribucije mase zraka (engl. *AM cumulative distribution function - AMCDF*) za prikaz odnosa između  $AM$  i spektralnog učinka. Otkriveno je da kada je  $AM$  manja

od 4,5, odnos između  $I_{scn}$  i AMCDF može se dobro prikazati polinomom petog reda. Za  $AM$  vrijednosti veće od 4,5, odnos postaje nepravilan zbog utjecaja  $R_d$ . Razvijen je novi model koji kombinira AMCDF i omjer difuznog zračenja za procjenu spektralnog učinka. Kada je  $AM$  manja od 1,5, utjecaj Sunčevog spektra na  $I_{sc}$  je zanemariv. Iako ovaj model predstavlja zanimljiv pristup procjeni utjecaja Sunčevog spektra na  $I_{sc}$  FN ćelije, važno je napomenuti da nije široko prihvaćen niti validiran u praksi. Nedostaje opsežnija validacija modela na različitim lokacijama i tipovima FN ćelija kako bi se potvrdile njegove predikcijske mogućnosti. Bez takve validacije, teško je procijeniti koliko je model precizan i primjenjiv u stvarnim uvjetima u odnosu na postojeće metode procjene spektralnog utjecaja.

#### 4.4. $APE$ i $APE-\varepsilon$ funkcije

Metodologija predložena 2022. godine u radu [126] predstavlja novi pristup modeliranju performansi FN sustava korištenjem faktora  $APE$  za karakterizaciju Sunčevog spektra. Autori predlažu SCF temeljenu na  $APE$ , za koju pokazuju da je točnija i općenitija od tradicionalnih metoda koje koriste  $AM$  ili  $K_t$  kao varijable za opisivanje spektralnih učinaka. Model temeljen na  $APE$  objašnjava gotovo 90% varijabilnosti u FN spektralnoj učinkovitosti, u usporedbi s oko 65% za modele temeljene na  $AM$ . Predložena  $APE$  funkcija nudi 30% povećanje prediktivne točnosti u usporedbi s tradicionalnom  $AM$  funkcijom i 17% poboljšanje u odnosu na  $AM-K_t$  funkciju.  $APE$  metoda dobro funkcionira i u vedrim i u oblačnim uvjetima, za razliku od nekih postojećih modela ograničenih na vedro nebo.

Studija validira model koristeći 12 mjeseci podataka o vanjskim performansama za a-Si FN ćelije u Coloradu, SAD.  $APE$  funkcija preciznije opisuje i kratkoročne (15-minutne) fluktuacije i dugoročne sezonske promjene u FN performansama od postojećih metoda. Za izvođenje i validaciju predloženog modela korištena je a-Si FN ćelija. Podaci za ovu demonstraciju izvučeni su iz javno dostupnog empirijskog skupa podataka koji je razvio Nacionalni laboratorij za obnovljive izvore energije (engl. *National Renewable Energy Laboratory - NREL*). Na temelju godišnje varijacije prosječne energije fotona tijekom jedne godine, skup podataka je podijeljen od siječnja do kolovoza i od rujna do prosinca. Prvi podskup podataka koristi se za izvođenje modela, dok se drugi koristi za validaciju modela. Tvrdi se da ova podjela za oba skupa podataka uključuje puni raspon  $APE$  vrijednosti koje se javljaju tijekom jedne godine. Funkcionalni oblik rezultirajućeg modela je polinom četvrtog reda koji korelira  $I_{scn}$  s  $APE$ :



$$I_{scn} = f(\varphi) = \sum_{n=0}^4 c_n \cdot \varphi^n \quad 4.7$$

U radu [114] je validirana SCF bazirana na *APE* za različite FN tehnologije, čime se proširuje njezina primjenjivost, te je razvijena nova, poboljšana SCF koja kombinira *APE* s dodatnim parametrom, dubinom apsorpcijskog pojasa vode  $\varepsilon$ , kako bi se postiglo još preciznije predviđanje performansi. Metodologija istraživanja uključivala je analizu podataka za tri različite FN tehnologije: m-Si, CdTe i troslojnu a-Si. Ove tehnologije obuhvaćaju značajan udio trenutno korištenih FN materijala na tržištu, pružajući čvrsti temelj za validaciju predloženih modela. Istraživači su razvili novi model, označen kao  $f(\varphi, \varepsilon)$ , koji kombinira *APE* ( $\varphi$ ) s  $\varepsilon$ . Ovaj model je zatim optimiziran i validiran usporedbom s postojećim metodama. Rezultati istraživanja bili su izuzetno obećavajući. Novi model  $f(\varphi, \varepsilon)$  pokazao je značajna poboljšanja u točnosti predviđanja u usporedbi s tradicionalnim SCF metodama koje koriste zamjenske varijable. Za m-Si i troslojnu a-Si ćeliju poboljšanja su dosegla impresivnih 60%, dok je za CdTe ćelije poboljšanje bilo oko 20%. Čak i u usporedbi s *APE* metodom [126], novi model je pokazao daljnja poboljšanja točnosti - oko 10% za trostruki spoj a-Si i m-Si ćelije, te oko 2% za CdTe ćelije. Zaključci izvedeni iz ovog istraživanja su značajni za područje FN tehnologije. Predloženi model uspješno rješava problem jedinstvenosti *APE* parametra, istovremeno zadržavajući veću točnost koja dolazi s izravnom reprezentacijom spektra. Štoviše, model je dizajniran tako da se lako može integrirati u šire modele performansi FN sustava, što otvara put za poboljšano predviđanje u raznim primjenama.

Originalna publikacija  $f(\varphi, \varepsilon)$  pokazuje da različiti funkcionalni oblici mogu biti optimalni za različite vrste FN tehnologija i spektralne pojaseve  $\varepsilon$  korištene u modelu. Međutim, pojednostavljeni model koji postiže kompromis između točnosti i složenosti modela izveden je korištenjem dvodimenzionalne polinomne funkcije oblika:

$$I_{scn} = d_0 + d_1 \cdot \varphi + d_2 \cdot \varepsilon + d_3 \cdot \varphi^2 + d_4 \cdot \varepsilon^2 + d_5 \cdot \varphi \cdot \varepsilon \quad 4.8$$

gdje su  $d_0$ - $d_5$  koeficijenti koji su različiti za svaku FN tehnologiju.

## 5. ZAKLJUČAK

Ovaj rad pruža pregled metoda modeliranja utjecaja spektra Sunčevog zračenja na učinkovitost FN ćelija i načina uključivanja tih modela u simulacijske programske alate. Detaljno su opisane karakteristike spektra Sunčevog zračenja, uključujući njegov nastanak kroz nuklearnu fuziju u Suncu i njegovu interakciju sa Zemljinom atmosferom. Analizirane su različite FN tehnologije, od kristalnih silicijskih ćelija prve generacije do naprednih koncepata treće generacije, ističući njihove prednosti i ograničenja. Posebna pažnja posvećena je standardima za analizu performansi FN ćelija, s naglaskom na seriju standarda IEC 61853 koja predstavlja značajan napredak u procjeni njihovog rada u različitim uvjetima. Opisan je spektralni odziv FN ćelija te je objašnjeno kako različite FN tehnologije reagiraju na različite dijelove Sunčevog spektra, što ima značajne implikacije za njihovu učinkovitost u različitim atmosferskim uvjetima i geografskim lokacijama.

Zaključeno je da modeli koji opisuju utjecaj spektra Sunčevog zračenja na performanse FN sustava predstavljaju sve važniju komponentu u modeliranju FN sustava. Ovi modeli, poznati kao SCF, primjenjuju korekciju na referentnu vrijednost performansi kako bi se uzeo u obzir utjecaj spektra. Trenutno postoji širok raspon različitih SCF, pri čemu neke koriste zamjenske varijable za reprezentaciju Sunčevog spektra, dok druge koriste ulazne parametre izvedene izravno iz spektra. Ovaj pregled literature ukazuje na to da su SCF temeljene na zamjenskim varijablama dostigle visoku razinu preciznosti i nude relativno jednostavan način za računanje spektralnog utjecaja na FN performanse. Međutim, njihova upotreba mogla bi biti rjeđa u budućnosti, i to zbog ograničenog opsega podataka koje zamjenske varijable pružaju o obliku Sunčevog spektra.

S druge strane, modeli čiji su ulazni parametri izvedeni izravno iz Sunčevog spektra nude preciznije modeliranje spektralne korekcije. Ipak, simulacija takvih spektralnih parametara je složenija u usporedbi s parametrima zamjenskih varijabli. Važno je napomenuti da objavljene SCF temeljene na spektralnim parametrima nisu validirane korištenjem simuliranih ulaznih podataka. Za usporedbu relativne točnosti različitih SCF i određivanje optimalnog modela za specifične uvjete, neophodna je standardizirana mjerna procedura. Najvažnija područja istraživanja kroz ovakvu standardiziranu proceduru uključuju performanse različitih modela u specifičnim klimatskim uvjetima i za različite FN uređaje. Nadalje, nužna je usporedba performansi modela temeljenih na korištenju i mjerenih i simuliranih podataka, posebice za

SCF temeljene na mjerenom spektru, poput  $f(\varphi)$  i  $f(\varphi, \varepsilon)$ . Također, daljnja istraživanja mogla bi se usredotočiti na kvantificiranje geografske ovisnosti SCF i razvoj modela koji su prilagodljivi različitim lokacijama, integraciju naprednih tehnika strojnog učenja za modeliranje spektralnih utjecaja, utjecaj spektralnih korekcija na nove FN tehnologije i integraciju spektralnih modela u programske alate za simulaciju FN sustava.

## POPIS KRATICA

OIE – obnovljivi izvori energije

FN – fotonaponski

EES – elektroenergetski sustav

STC – standardni testni uvjeti (engl. *standard test conditions*)

SCF – funkcija spektralne korekcije (engl. *spectral correction function*)

UV – ultraljubičasto

IR – infracrveno

c-Si – monokristalni silicij

p-Si – polikristalni silicij

a-Si – amorfni silicij

CdTe – kadmij telurid

CIGS – bakar indij galij selenid

OPV – organska fotonaponska ćelija (engl. *organic photovoltaic solar cell*)

DSSC – fotonaponska ćelija osjetljiva na boje (engl. *dye-sensitized solar cell*)

PSC – perovskitna fotonaponska ćelija (engl. *perovskite solar cell*)

BIPV – fotonaponski sustavi integrirani u zgrade (engl. *building integrated photovoltaics*)

IEC – međunarodna elektrotehnička komisija (engl. *International Electrotechnical Commission*)

ASTM – američka udruga za ispitivanje i materijale (engl. *American Society for Testing and Materials*)

SR – spektralni odziv (engl. *spectral response*)

QE – kvantna efikasnost (engl. *quantum efficiency*)

CPV – koncentratorski fotonaponski sustavi (engl. *concentrator photovoltaics*)

$I_{sc}$  – struja kratkog spoja

$V_{oc}$  – napon otvorenog kruga

NOCT – nominalna radna temperatura ćelije (engl. *nominal operating cell temperature*)

AM – masa zraka

$K_t$  – indeks prozirnosti

W – taložna voda

APE – prosječna energija fotona (engl. *average photon energy*)

ISI – integrirani spektralni intenzitet

GHI – globalno horizontalno zračenje (engl. *global horizontal irradiance*)

*GEI* – globalno ekstraterestričko zračenje (engl. *global extraterrestrial irradiance*)  
a-Si:H – hidratizirani amorfni silicij  
*M* – faktor neusklađenosti spektra (engl. *spectral mismatch factor*)  
*AOD* – optička dubina aerosola (engl. *aerosol optical depth*)  
*UF* – korisni udio (engl. *useful fraction*)  
*WUF* – težinski korisni udio (engl. *weighted useful fraction*)  
*I<sub>scn</sub>* – normalizirana struja kratkog spoja  
*SAPM* – Sandia model performansi FN niza (engl. *Sandia Array Performance Model*)  
*AM<sub>a</sub>* – apsolutna masa zraka  
*SNL* – Sandia nacionalni laboratorij (engl. *Sandia National Laboratory*)  
*SMARTS* – Jednostavan model atmosferskog radijacijskog prijenosa Sunčeve svjetlosti (engl. *Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine*)  
*TMY* – tipična meteorološka godina (engl. *typical meteorological year*)  
*PPI* – indeks performansi sustava (engl. *power performance index*)  
*JRC* – zajednički istraživački centar (engl. *Joint Research Center*)  
*R<sup>2</sup>* – koeficijent determinacije  
*RMSE* – srednja kvadratna pogreška  
*AMCDF* – funkcija kumulativne distribucije mase zraka (engl. *AM cumulative distribution function*)  
*NREL* – Nacionalni laboratorij za obnovljive izvore energije (engl. *National Renewable Energy Laboratory*)

## LITERATURA

- [1] S. Niu, "Nuclear fusion introduction and artificial fusion status," *Theoretical and Natural Science*, vol. 28, no. 1, pp. 10–17, Dec. 2023, doi: 10.54254/2753-8818/28/20230314.
- [2] L. Wang and J. Yu, "Principles of photocatalysis," 2023, pp. 1–52. doi: 10.1016/B978-0-443-18786-5.00002-0.
- [3] T. Chithambaram and P. Swarnalatha, "Deep Learning-Driven Detection of Nuclear Fusion Ignition: Illuminating the Path to Clean and Sustainable Energy," in *2023 3rd International Conference on Smart Generation Computing, Communication and Networking (SMART GENCON)*, Bangalore, India: IEEE, Dec. 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/SMARTGENCON60755.2023.10442476.
- [4] B. Parida, S. Iniyar, and R. Goic, "A review of solar photovoltaic technologies," Apr. 2011. doi: 10.1016/j.rser.2010.11.032.
- [5] M. V. Dambhare, B. Butey, and S. V. Moharil, "Solar photovoltaic technology: A review of different types of solar cells and its future trends," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Jun. 2021. doi: 10.1088/1742-6596/1913/1/012053.
- [6] N. Rathore, N. L. Panwar, F. Yettou, and A. Gama, "A comprehensive review of different types of solar photovoltaic cells and their applications," 2021, *Taylor and Francis Ltd*. doi: 10.1080/01430750.2019.1592774.
- [7] M. H. Shubbak, "Advances in solar photovoltaics: Technology review and patent trends," Nov. 01, 2019, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2019.109383.
- [8] A. C. Lazaroiu, M. Gmal Osman, C. V. Strejoiu, and G. Lazaroiu, "A Comprehensive Overview of Photovoltaic Technologies and Their Efficiency for Climate Neutrality," Dec. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/su152316297.
- [9] J. Ramanujam and U. P. Singh, "Copper indium gallium selenide based solar cells - A review," Jun. 01, 2017, *Royal Society of Chemistry*. doi: 10.1039/c7ee00826k.
- [10] T. Ibn-Mohammed *et al.*, "Perovskite solar cells: An integrated hybrid lifecycle assessment and review in comparison with other photovoltaic technologies," 2017, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.095.
- [11] M. Ratner, "The Physics of Solar Cells ; Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion," *Phys Today*, vol. 57, no. 12, pp. 71–72, Dec. 2004, doi: 10.1063/1.1878345.
- [12] C. J. Brabec, N. S. Sariciftci, and J. C. Hummelen, "Plastic solar cells," *Adv Funct Mater*, pp. 15–26, 2001, doi: [https://doi.org/10.1002/1616-3028\(200102\)11:1<15::AID-ADFM15>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/1616-3028(200102)11:1<15::AID-ADFM15>3.0.CO;2-A).
- [13] M. Grätzel, "Dye-sensitized solar cells," Oct. 31, 2003, *Elsevier*. doi: 10.1016/S1389-5567(03)00026-1.
- [14] J.-P. Correa-Baena *et al.*, "Promises and challenges of perovskite solar cells," *Science (1979)*, vol. 358, pp. 739–744, 2017, doi: 10.1126/science.aam6323.

- [15] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, and W. Warta, "Solar cell efficiency tables (version 37)," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 19, no. 1, pp. 84–92, Jan. 2011, doi: 10.1002/pip.1088.
- [16] M. Ruben Vogt *et al.*, "PV Module Energy Rating Standard IEC 61853-3 Intercomparison and Best Practice Guidelines for Implementation and Validation," *IEEE J Photovolt*, vol. 12, no. 3, pp. 844–852, May 2022, doi: 10.1109/JPHOTOV.2021.3135258.
- [17] J. H. Wohlgemuth, "Standards for PV Modules and Components-Recent Developments and Challenges," 2012. doi: <https://www.osti.gov/biblio/1063692>.
- [18] L. St.Hilaire and E. Janssen, "IEC 61853-1: Photovoltaic module performance testing and energy rating assessment for canada Sustainable Technologies Evaluation Program," Toronto, Dec. 2015. [Online]. Available: [www.sustainabletechnologies.ca](http://www.sustainabletechnologies.ca)
- [19] G. Friesen *et al.*, "INTERCOMPARISON OF DIFFERENT ENERGY PREDICTION METHODS WITHIN THE EUROPEAN PROJECT 'PERFORMANCE'-RESULTS OF THE 1ST ROUND ROBIN."
- [20] H. M. El-Shafeai, S. A. Badawy, M. A. Ismail, E. Abdel-Latif, A. A. Fadda, and M. R. Elmorsy, "Synthesis of efficient bi-anchoring bifuran/biphenyl derivatives for dye-sensitized solar cell applications," *RSC Adv*, vol. 13, no. 14, pp. 9720–9731, Mar. 2023, doi: 10.1039/d3ra00609c.
- [21] "Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface 1." [Online]. Available: [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [22] U. Köhler *et al.*, "Optical characterisation of three reference Dobsons in the ATMOZ Project - Verification of G. M. B. Dobson's original specifications," *Atmos Meas Tech*, vol. 11, no. 4, pp. 1989–1999, Apr. 2018, doi: 10.5194/amt-11-1989-2018.
- [23] C. B. Honsberg and S. G. Bowden, "Photovoltaics Education Website," [www.pveducation.org](http://www.pveducation.org).
- [24] A. M. G. Amillo, T. Huld, P. Vourlioti, R. Müller, and M. Norton, "Application of satellite-based spectrally-resolved solar radiation data to PV performance studies," *Energies (Basel)*, vol. 8, no. 5, pp. 3455–3488, 2015, doi: 10.3390/en8053455.
- [25] M. Seval and B. Ozcan, "Characterization of Simulator and Relative Spectral Responsivity Measurements of Photovoltaic Modules with Band Pass Filter Technique," *Open Journal of Energy Efficiency*, vol. 11, no. 03, pp. 71–87, 2022, doi: 10.4236/ojee.2022.113006.
- [26] E. F. Fernández, A. Soria-Moya, F. Almonacid, and J. Aguilera, "Comparative assessment of the spectral impact on the energy yield of high concentrator and conventional photovoltaic technology," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 147, pp. 185–197, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.solmat.2015.12.003.
- [27] C. N. Jardine, G. J. Conibeer, and K. Lane, "PV-COMPARE: Direct Comparison of Eleven PV Technologies at Two Locations in Northern and Southern Europe."
- [28] L. Nelson, M. Fichtl, and A. Panchula, "Changes in cadmium telluride photovoltaic system performance due to spectrum," *IEEE J Photovolt*, vol. 3, no. 1, pp. 488–493, 2013, doi: 10.1109/JPHOTOV.2012.2226868.
- [29] G. S. Kinsey *et al.*, "Impact of measured spectrum variation on solar photovoltaic efficiencies worldwide," 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148122010072>

- [30] S. Meilinger, A. Herman-Czezuch, A. Zemo, and M. Bebbler, "Impact of dust storms and urban air pollution on PV-power systems: Case studies from Ghana," Jun. 2021. doi: 10.5194/ems2021-419.
- [31] K. Olson, E. Nelson, P. Cohen, and J. Talghader, "Optimal lateral splitting of the AM1.5 solar spectrum for a mono-Si and CdTe two cell PV array," in *Program of the 37rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Seattle, WA, USA: IEEE, 2011, pp. 2100–2104. doi: 10.1109/PVSC.2011.6186367.
- [32] S. Boppana, K. Passow, J. Sorensen, B. H. King, and C. Robinson, "Impact of uncertainty in IAM measurement on energy predictions," in *WCPEC : 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Waikoloa Village, HI, USA: IEEE, Jun. 2018, p. 541. doi: 10.1109/PVSC.2018.8548024.
- [33] A. Luque and S. Hegedus, Eds., *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Wiley, 2010. doi: 10.1002/9780470974704.
- [34] B. V Chikate, Y. A. Sadawarte, and B. D. C. O. E. Sewagram, "The Factors Affecting the Performance of Solar Cell," *Int J Comput Appl*, 2015.
- [35] S. Kalogirou, "Solar Energy Engineering Processes and Systems," 2009.
- [36] K. V Vidyanandan, "An Overview of Factors Affecting the Performance of Solar PV Systems," 2017. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/319165448>
- [37] M. K. S. Al-Ghezi, R. T. Ahmed, and M. T. Chaichan, "The Influence of Temperature and Irradiance on Performance of the Photovoltaic Panel in the Middle of Iraq," *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 11, no. 2, pp. 501–513, May 2022, doi: 10.14710/ijred.2022.43713.
- [38] M. E. Meral and F. Diner, "A review of the factors affecting operation and efficiency of photovoltaic based electricity generation systems," Jun. 2011. doi: 10.1016/j.rser.2011.01.010.
- [39] D. L. King, W. E. Boyson, and J. A. Kratochvil, "Photovoltaic Array Performance Model," Albuquerque, New Mexico, 2003.
- [40] NREL, "Reference Air Mass 1.5 Spectra ." Accessed: Aug. 07, 2024. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html>
- [41] C. J. Riordan and R. L. Hulstrom, "Summary of Studies that Examine the Effects of Spectral Solar Radiation Variations on PV Device Design and Performance," Golden, Colorado, 1989.
- [42] S. Nann and K. Emery, "Spectral effects on PV-device rating," 1992.
- [43] Y. Hirata and T. Tani, "Evaluation of Photovoltaic Modules Considering Spectral Solar Radiation," 1994.
- [44] Y. Hirata and T. Tan17, "OUTPUT VARIATION OF PHOTOVOLTAIC MODULES WITH ENVIRONMENTAL FACTORS-I. THE EFFECT OF SPECTRAL SOLAR RADIATION ON PHOTOVOLTAIC MODULE OUTPUT," 1995.
- [45] A. H. Shnishil, S. S. Chid, M. J. Yaseen, and T. J. Alwana, "Influence of air mass on the performance of many types of PV modulus in Baghdad," in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2011, pp. 153–159. doi: 10.1016/j.egypro.2011.05.018.



- [46] K. Sadiq Reza, "The impact of air mass on photovoltaic panel performance," 2016, doi: 10.18282/ser.v1.i1.41.
- [47] R. P. Kenny, A. Ioannides, H. Müllejans, W. Zaaiman, and E. D. Dunlop, "Performance of thin film PV modules," *Thin Solid Films*, vol. 511–512, pp. 663–672, Jul. 2006, doi: 10.1016/j.tsf.2005.11.066.
- [48] K. Passow and M. Lee, *2016 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)*. IEEE, 2016.
- [49] D. L. King, "Photovoltaic module and array performance characterization methods for all system operating conditions," AIP Publishing, May 2008, pp. 347–368. doi: 10.1063/1.52852.
- [50] F. Kasten and A. T. Young, "Revised optical air mass tables and approximation formula," 1989.
- [51] C. Gueymard, "SMARTS2, A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algorithms and performance assessment Simple Model for the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine (SMARTS2) Algorithms and performance assessment," 1995.
- [52] B. Y. H. Liu and R. C. Jordan, "The Interrelationship and of Direct, Diffuse and Characteristic Distribution Total Solar Radiation\*," 1960.
- [53] E. Bauer, "The Scattering of Infrared Radiation from Clouds," 1964.
- [54] H. H. Blau, R. P. Espinola, and E. C. Reifenstein, "Near Infrared Scattering by Sunlit Terrestrial Clouds," 1966.
- [55] U. Feister, N. Cabrol, and D. Häder, "UV irradiance enhancements by scattering of solar radiation from clouds," *Atmosphere (Basel)*, vol. 6, no. 8, pp. 1211–1228, Aug. 2015, doi: 10.3390/atmos6081211.
- [56] J. Calbó, D. Pagès, and J. A. González, "Empirical studies of cloud effects on UV radiation: A review," Jun. 2005. doi: 10.1029/2004RG000155.
- [57] T. Ishii, K. Otani, T. Takashima, and Y. Xue, "Solar spectral influence on the performance of photovoltaic (PV) modules under fine weather and cloudy weather conditions," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 21, no. 4, pp. 481–489, Jun. 2013, doi: 10.1002/pip.1210.
- [58] R. Perez, R. Seals, and A. Zelenka, "Making Full Use of the Clearness Index for Parametrizing Hourly Insolation Conditions," 1990.
- [59] D. T. Reindl, W. A. Beckman, and J. A. Duffie, "Diffuse Fraction Correlations," 1990.
- [60] J. Mustafa, S. Husain, S. Alqaed, U. A. Khan, and B. Jamil, "Performance of Two Variable Machine Learning Models to Forecast Monthly Mean Diffuse Solar Radiation across India under Various Climate Zones," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 21, Nov. 2022, doi: 10.3390/en15217851.
- [61] E. Paulescu and M. Paulescu, "A Semi-Analytical Model for Separating Diffuse and Direct Solar Radiation Components," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 24, Dec. 2022, doi: 10.3390/app122412759.

- [62] J. Peng, L. Lu, and M. Wang, "A new model to evaluate solar spectrum impacts on the short circuit current of solar photovoltaic modules," *Energy*, vol. 169, pp. 29–37, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.12.003.
- [63] F. Almonacid, E. F. Fernández, B. Almonacid-Cruz, and P. M. Rodrigo, "Spectral-matching-ratio modelling based on ANNs and atmospheric parameters for the electrical characterization of multi-junction concentrator PV systems," *Energy*, vol. 156, pp. 409–417, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.05.105.
- [64] Q. Zhao, Y. Yao, and W. Yao, "Studies of precipitable water vapour characteristics on a global scale," *Int J Remote Sens*, vol. 40, no. 1, pp. 72–88, Jan. 2019, doi: 10.1080/01431161.2018.1492177.
- [65] J. Wang, L. Zhang, A. Dai, T. Van Hove, and J. Van Baelen, "A near-global, 2-hourly data set of atmospheric precipitable water from ground-based GPS measurements," *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, vol. 112, no. 11, Jun. 2007, doi: 10.1029/2006JD007529.
- [66] C. H. Reitan, "Surface Dew Point and Water Vapor Aloft," *Journal of Applied Meteorology*, pp. 776–779, 1963, doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1963\)002<0776:SDPAWV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1963)002<0776:SDPAWV>2.0.CO;2).
- [67] C. Gueymard, "Analysis of monthly average atmospheric precipitable water and turbidity in Canada and northern United States," 1994.
- [68] C. Gueymard, "Assessment of the Accuracy and Computing Speed of Simplified Saturation Vapor Equations Using a New Reference Dataset," *Journal of Applied Meteorology*, pp. 1294–1300, 1992, doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1993\)032<1294:AOTAAC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1993)032<1294:AOTAAC>2.0.CO;2).
- [69] S. Tabata, "A simple but accurate formula for the saturation vapor pressure over liquid water," *Journal of Applied Meteorology*, pp. 1410–1411, 1973.
- [70] P. R. Lowe, "An approximating polynomial for the computation of saturation vapor pressure," *Journal of Applied Meteorology*, pp. 100–103, 1977, doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1977\)016<0100:AAPFTC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1977)016<0100:AAPFTC>2.0.CO;2).
- [71] W. E. Langlois, "A rational approximation for saturation vapor pressure over the temperature range of sea water," *J Appl Meteorol Climatol*, pp. 451–451, 1967, doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1967\)006<0451:ARAFSV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1967)006<0451:ARAFSV>2.0.CO;2).
- [72] G. L. Stephens, "On the relationship between water vapor over the oceans and sea surface temperature," *J Clim*, pp. 634–645, 1990, doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1990\)003<0634:OTRBWV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1990)003<0634:OTRBWV>2.0.CO;2).
- [73] J. A. Ruiz-Arias and C. A. Gueymard, "Solar resource for high-concentrator photovoltaic applications," *Green Energy and Technology*, vol. 190, pp. 261–302, 2015, doi: 10.1007/978-3-319-15039-0\_10.
- [74] A. Ångström, "On the Atmospheric Transmission of Sun Radiation and on Dust in the Air," *Geografiska Annaler*, vol. 11, no. 2, pp. 156–166, Aug. 1929, doi: 10.1080/20014422.1929.11880498.
- [75] C. A. Gueymard and D. Yang, "Worldwide validation of CAMS and MERRA-2 reanalysis aerosol optical depth products using 15 years of AERONET observations," *Atmos Environ*, vol. 225, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117216.

- [76] J. P. Putaud *et al.*, “A European aerosol phenomenology - 3: Physical and chemical characteristics of particulate matter from 60 rural, urban, and kerbside sites across Europe,” *Atmos Environ*, vol. 44, no. 10, pp. 1308–1320, Mar. 2010, doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.12.011.
- [77] I. Dincer, *Comprehensive energy systems*. Elsevier, 2018.
- [78] S. Kalogirou, *McEvoy’s Handbook of Photovoltaics, Third Edition: Fundamentals and Applications*, 3rd ed. Academic Press, 2017.
- [79] J.-L. Dufresne, C. Gautier, and P. Ricchiazzi, “Longwave Scattering Effects of Mineral Aerosols,” *Journal of Atmospheric Sciences*, pp. 1959–1966, 2002.
- [80] B. Sweerts, S. Pfenninger, S. Yang, D. Folini, B. van der Zwaan, and M. Wild, “Estimation of losses in solar energy production from air pollution in China since 1960 using surface radiation data,” *Nat Energy*, vol. 4, no. 8, pp. 657–663, Aug. 2019, doi: 10.1038/s41560-019-0412-4.
- [81] I. Neher, T. Buchmann, S. Crewell, B. Pospichal, and S. Meilinger, “Impact of atmospheric aerosols on solar power,” *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 28, no. 4, pp. 305–321, 2019, doi: 10.1127/metz/2019/0969.
- [82] C. Stark and M. Theristis, *The Impact of Atmospheric Parameters on the Spectral Performance of Multiple Photovoltaic Technologies*. IEEE, 2015.
- [83] M. Theristis, E. F. Fernández, C. Stark, and T. S. O’Donovan, “A theoretical analysis of the impact of atmospheric parameters on the spectral, electrical and thermal performance of a concentrating III-V triple-junction solar cell,” *Energy Convers Manag*, vol. 117, pp. 218–227, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.03.036.
- [84] P. G. Kosmopoulos *et al.*, “Dust impact on surface solar irradiance assessed with model simulations, satellite observations and ground-based measurements,” *Atmos Meas Tech*, vol. 10, no. 7, pp. 2435–2453, Jul. 2017, doi: 10.5194/amt-10-2435-2017.
- [85] X. Li, F. Wagner, W. Peng, J. Yang, and D. L. Mauzerall, “Reduction of solar photovoltaic resources due to air pollution in China,” *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 114, no. 45, pp. 11867–11872, Nov. 2017, doi: 10.1073/pnas.1711462114.
- [86] J. L. Gómez-Amo, M. D. Freile-Aranda, J. Camarasa, V. Estellés, M. P. Utrillas, and J. A. Martínez-Lozano, “Empirical estimates of the radiative impact of an unusually extreme dust and wildfire episode on the performance of a photovoltaic plant in Western Mediterranean,” *Appl Energy*, vol. 235, pp. 1226–1234, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.11.052.
- [87] B. N. Holben *et al.*, “AERONET-A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization tion of a new Sun-sky scanning radiometer system that,” 1998. [Online]. Available: <http://spamer.gsfc.nasa.gov>.
- [88] L. A. Remer *et al.*, “Global aerosol climatology from the MODIS satellite sensors,” *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, vol. 113, no. 14, 2008, doi: 10.1029/2007JD009661.
- [89] C. N. Jardine *et al.*, “Influence of Spectral Effects on the Performance of Multijunction Amorphous Silicon Cells,” 2002. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/237353852>

- [90] T. Rodziewicz and M. Rajfur, "Numerical procedures and their practical application in PV modules' analyses. Part II: Useful fractions and APE," Jun. 01, 2019, *Association of Polish Electrical Engineers (SEP)*. doi: 10.1016/j.opelre.2019.05.004.
- [91] M. Piliouguine, D. Elizondo, L. Mora-López, and M. Sidrach-de-Cardona, "Multilayer perceptron applied to the estimation of the influence of the solar spectral distribution on thin-film photovoltaic modules," *Appl Energy*, vol. 112, pp. 610–617, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.05.053.
- [92] L. A. Conde, J. R. Angulo, M. Sevillano-Bendezú, G. Nofuentes, J. A. Töfflinger, and J. de la Casa, "Spectral effects on the energy yield of various photovoltaic technologies in Lima (Peru)," *Energy*, vol. 223, May 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.120034.
- [93] R. Moreno-Sáez and L. Mora-López, "Modelling the distribution of solar spectral irradiance using data mining techniques," *Environmental Modelling and Software*, vol. 53, pp. 163–172, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.envsoft.2013.12.002.
- [94] C. Cornaro and A. Andreotti, "Influence of Average Photon Energy index on solar irradiance characteristics and outdoor performance of photovoltaic modules," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 21, no. 5, pp. 996–1003, Aug. 2013, doi: 10.1002/pip.2194.
- [95] G. Nofuentes, B. García-Domingo, J. V. Muñoz, and F. Chenlo, "Analysis of the dependence of the spectral factor of some PV technologies on the solar spectrum distribution," *Appl Energy*, vol. 113, pp. 302–309, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.07.044.
- [96] T. Minemoto *et al.*, "Effect of spectral irradiance distribution on the outdoor performance of amorphous Si//thin-film crystalline Si stacked photovoltaic modules," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 91, no. 2–3, pp. 120–122, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.solmat.2006.07.014.
- [97] S. R. Williams, T. R. Betts, and H. G. Beyer, "Modelling long-term module performance based on realistic reporting conditions with consideration to spectral effects," 2003, doi: 10.1109/WCPEC.2003.1306312.
- [98] T. Minemoto, Y. Nakada, H. Takahashi, and H. Takakura, "Uniqueness verification of solar spectrum index of average photon energy for evaluating outdoor performance of photovoltaic modules," *Solar Energy*, vol. 83, no. 8, pp. 1294–1299, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.solener.2009.03.004.
- [99] G. Nofuentes, C. A. Gueymard, J. Aguilera, M. D. Pérez-Godoy, and F. Charte, "Is the average photon energy a unique characteristic of the spectral distribution of global irradiance?," *Solar Energy*, vol. 149, pp. 32–43, 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.03.086.
- [100] T. Ishii, K. Otani, A. Itagaki, and K. Utsunomiya, "A methodology for estimating the effect of solar spectrum on photovoltaic module performance by using average photon energy and a water absorption band," *Jpn J Appl Phys*, vol. 51, no. 10 PART 2, Oct. 2012, doi: 10.1143/JJAP.51.10NF05.
- [101] Y. Hirata and T. Tani, "Output variation of photovoltaic modules with environmental factors-I. the effect of spectral solar radiation on photovoltaic module output," 1995.
- [102] R. Gottschalg, T. R. Betts, D. G. Infield, and M. J. Kearney, "The effect of spectral variations on the performance parameters of single and double junction amorphous silicon solar cells,"

- Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 85, no. 3, pp. 415–428, Jan. 2005, doi: 10.1016/j.solmat.2004.05.011.
- [103] M. Piliouguine *et al.*, “Comparative analysis of energy produced by photovoltaic modules with anti-soiling coated surface in arid climates,” *Appl Energy*, vol. 112, pp. 626–634, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.01.048.
- [104] N. Katsumata, Y. Nakada, T. Minemoto, and H. Takakura, “Estimation of irradiance and outdoor performance of photovoltaic modules by meteorological data,” in *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Jan. 2011, pp. 199–202. doi: 10.1016/j.solmat.2010.01.019.
- [105] R. Gottschalg, D. G. Infield, and M. J. Kearney, “Experimental study of variations of the solar spectrum of relevance to thin film solar cells,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 79, no. 4, pp. 527–537, Sep. 2003, doi: 10.1016/S0927-0248(03)00106-5.
- [106] P. Rodrigo, E. F. Fernández, F. Almonacid, and P. J. Pérez-Higueras, “A simple accurate model for the calculation of shading power losses in photovoltaic generators,” *Solar Energy*, vol. 93, pp. 322–333, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.solener.2013.04.009.
- [107] T. Rodziewicz, J. Teneta, A. Zaremba, and M. Waclawek, “Analysis of solar energy resources in southern poland for photovoltaic applications,” *Ecological Chemistry and Engineering S*, vol. 20, no. 1, pp. 177–198, Mar. 2013, doi: 10.2478/eces-2013-0014.
- [108] M. Simon and E. L. Meyer, “Spectral distribution on photovoltaic module performance in South Africa,” in *33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, T. J. Coutts, Ed., San Diego, California: [IEEE], 2008, pp. 1–5. doi: 10.1109/PVSC.2008.4922590.
- [109] M. Piliouguine, J. Carretero, L. Mora-López, and M. Sidrach-De-Cardona, “Experimental system for current-voltage curve measurement of photovoltaic modules under outdoor conditions,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 19, no. 5, pp. 591–602, Aug. 2011, doi: 10.1002/pip.1073.
- [110] R. Daxini and Y. Wu, “Review of methods to account for the solar spectral influence on photovoltaic device performance,” Jan. 01, 2024, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.energy.2023.129461.
- [111] B. H. King, C. W. Hansen, D. Riley, C. D. Robinson, and L. Pratt, “SANDIA REPORT Procedure to Determine Coefficients for the Sandia Array Performance Model (SAPM),” 2016. [Online]. Available: <http://www.ntis.gov/help/ordermethods.asp?loc=7-4-0#online>
- [112] T. Huld, T. Sample, and E. D. Dunlop, “A simple model for estimating the influence of spectrum variations on PV performance,” in *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Hamburg, Germany, 2009.
- [113] D. B. Magare *et al.*, “Effect of seasonal spectral variations on performance of three different photovoltaic technologies in India,” *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 93–103, Mar. 2016, doi: 10.1007/s40095-015-0190-0.
- [114] R. Daxini, R. Wilson, and Y. Wu, “Modelling the spectral influence on photovoltaic device performance using the average photon energy and the depth of a water absorption band for improved forecasting,” *Energy*, vol. 284, p. 129046, 2023, doi: 10.5439/10522.
- [115] “The Spectral Mismatch Factor,” Irvine, California, 2013. [Online]. Available: <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/>

- [116] "Spectral mismatch definition."
- [117] C. K. Kim, H. G. Kim, Y. H. Kang, and M. Oh, "Comprehensive Analysis of Spectral Mismatch Factor for Solar Cells Based on in Situ Observation of Aerosol Optical Depth Spectra and Solar Spectral Irradiance in Korea," *Int J Energy Res*, vol. 2023, 2023, doi: 10.1155/2023/2617427.
- [118] D. L. King, J. A. Kratochvil, and W. E. Boyson, "Measuring solar spectral and angle-of-incidence effects on photovoltaic modules and solar irradiance sensors," in *Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1997*, Anaheim, CA, USA, 1997. doi: 10.1109/PVSC.1997.654283.
- [119] W. F. Holmgren, C. W. Hansen, and M. A. Mikofski, "pvlib python: a python package for modeling solar energy systems," *J Open Source Softw*, vol. 3, no. 29, p. 884, Sep. 2018, doi: 10.21105/joss.00884.
- [120] M. Lee, L. Ngan, W. Hayes, J. Sorensen, and A. F. Panchula, "Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2015 IEEE 42nd," in *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, New Orleans, LA, USA: IEEE, 2015. doi: 10.1109/PVSC.2015.7356003.
- [121] S. Pelland and C. A. Gueymard, "Validation of Photovoltaic Spectral Effects Derived From Satellite-Based Solar Irradiance Products," Jun. 21, 2022. doi: 10.36227/techrxiv.20089658.v1.
- [122] M. Lee and A. Panchula, "Spectral correction for photovoltaic module performance based on air mass and precipitable water," in *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Portland, OR, USA: IEEE, 2016, pp. 1351–1356. doi: 10.1109/PVSC.2016.7749836.
- [123] S. Pelland, C. Beswick, D. Thevenard, A. Cote, A. Pai, and Y. Poissant, "Development and Testing of the PVSPEC Model of Photovoltaic Spectral Mismatch Factor," in *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jun. 2020, pp. 1258–1264. doi: 10.1109/PVSC45281.2020.9300932.
- [124] M. Theristis, E. F. Fernandez, F. Almonacid, and P. Perez-Higueras, "Spectral Corrections Based on Air Mass, Aerosol Optical Depth, and Precipitable Water for CPV Performance Modeling," *IEEE J Photovolt*, vol. 6, no. 6, pp. 1598–1604, Nov. 2016, doi: 10.1109/JPHOTOV.2016.2606702.
- [125] J. A. Caballero, E. F. Fernández, M. Theristis, F. Almonacid, and G. Nofuentes, "Spectral Corrections Based on Air Mass, Aerosol Optical Depth, and Precipitable Water for PV Performance Modeling," *IEEE J Photovolt*, vol. 8, no. 2, pp. 552–558, Mar. 2018, doi: 10.1109/JPHOTOV.2017.2787019.
- [126] R. Daxini, Y. Sun, R. Wilson, and Y. Wu, "Direct spectral distribution characterisation using the Average Photon Energy for improved photovoltaic performance modelling A R T I C L E I N F O," *Renew Energy*, vol. 201, pp. 1176–1188, 2022, doi: 10.5439/10522.