

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Ivan Bevanda

**MODELIRANJE UTJECAJA SPEKTRA SUNČEVA
ZRAČENJA NA UČINKOVITOST RADA
FOTONAPONSKOG MODULA KORIŠTENJEM
DOSTUPNIH ATMOSFERSKIH VARIJABLI**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Split, 2026.

Split, 2026.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Ivan Bevanda

*Modeliranje utjecaja spektra Sunčeva zračenja na
učinkovitost rada fotonaponskog modula korištenjem
dostupnih atmosferskih varijabli*

DOKTORSKA DISERTACIJA

Split, 2026.

Doktorska disertacija je izrađena na Zavodu za elektroniku i računarstvo,
Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje

Mentor: Prof. dr. sc. Tihomir Betti

Rad br.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

Ključne riječi: Sunčevo zračenje, spektar, model, prosječna energija fotona, faktor spektralne korekcije, fotonaponski modul

Znanstveno područje: tehničke znanosti

Znanstveno polje: elektrotehnika

Znanstvena grana: elektronika

Institucija na kojoj je rad izrađen: Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje

Mentor rada: Prof. dr. sc. Tihomir Betti

Broj stranica: 237

Broj slika: 140

Broj tablica: 53

Broj korištenih bibliografskih jedinica:

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:

1. XXXX. dr. sc. XXXX YYYYY, Naziv ustanove i grad
2. XXXX. dr. sc. XXXX YYYYY, Naziv ustanove i grad
3. XXXX. dr. sc. XXXX YYYYY, Naziv ustanove i grad
4. XXXX. dr. sc. XXXX YYYYY, Naziv ustanove i grad
5. XXXX. dr. sc. XXXX YYYYY, Naziv ustanove i grad

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:

1. XXXX. dr. sc. XXXX YYYYY, Naziv ustanove i grad
2. XXXX. dr. sc. XXXX YYYYY, Naziv ustanove i grad
3. XXXX. dr. sc. XXXX YYYYY, Naziv ustanove i grad
4. XXXX. dr. sc. XXXX YYYYY, Naziv ustanove i grad
5. XXXX. dr. sc. XXXX YYYYY, Naziv ustanove i grad

Disertacija obranjena dana: xx. mjesec 2026.

Modeliranje utjecaja spektra Sunčeva zračenja na učinkovitost rada fotonaponskog modula korištenjem dostupnih atmosferskih varijabli

Sažetak:

Visok porast udjela fotonaponskih (FN) sustava u ukupnom elektroenergetskom sustavu zahtijeva preciznije modeliranje njihove proizvodnje u realnim radnim uvjetima. Utjecaji temperature i ozračenja na rad FN modula su jako dobro istraženi, ali spektralne varijacije se uglavnom zanemaruju. To dovodi do značajnih pogrešaka u procjeni fotonaponske proizvodnje električne energije. U ovom radu provedena je detaljna analiza vremenskih i prostornih varijacija spektra Sunčeva zračenja na području Europe, kao i utjecaj tih promjena na rad dominantnih fotonaponskih tehnologija. Analiza je temeljena na postojećem modelu za sintetiziranje spektra iz satelitskih snimki, FARMS-NIT, a provedena je za trogodišnji period od 2017. - 2019. godine na 79 europskih lokacija koje su grupirane u četiri klimatske skupine. Spektralne varijacije iskazane su preko prosječne energije fotona, a njihov utjecaj na fotonaponsku pretvorbu izražen je pomoću faktora spektralne korekcije. S obzirom na faktor spektralne korekcije, analizirane lokacije su grupirane u četiri klastera, čime je postavljen temelj za proširenje postojeće klasifikacije klima za fotonaponske primjene.

Kako bi se omogućila jednostavnija procjena utjecaja spektralnog ozračenja na učinkovitost fotonaponske pretvorbe, razvijen je novi model za proračun faktora spektralne korekcije. U razvoju modela korištena je metoda slučajne šume za identifikaciju i rangiranje ključnih atmosferskih značajki, a koeficijenti modela određeni su metodom najmanjih kvadrata. Model je razvijen na temelju visokokvalitetnih mjernih podataka s tri klimatski različite lokacije: Golden u Coloradu (SAD), Almeria (Španjolska) i Lindenberg (Njemačka). Validacija modela provedena je na neovisnom skupu podataka i kroz usporedbu s referentnim modelima iz literature. U konačnici je opisana uspostava platforme za kontinuirano mjerenje spektra Sunčeva zračenja u Splitu, te su dani rezultati mjerenja i spektralna karakterizacija za 2025. godinu.

Ključne riječi: Sunčevo zračenje, spektar, model, prosječna energija fotona, faktor spektralne korekcije, fotonaponski modul

Modeling the Impact of the Solar Radiation Spectrum on Photovoltaic Module Performance Using Available Atmospheric Variables

Abstract:

A strong increase in the share of photovoltaic (PV) systems in the overall power system calls for more accurate modeling of their energy yield under real operating conditions. The effects of temperature and irradiance on PV module performance are well studied, whereas spectral variations are mostly neglected. This can lead to significant errors in the estimation of PV electricity production. In this dissertation, a detailed analysis of the temporal and spatial variations of the solar spectrum over Europe is carried out, together with an assessment of how these variations affect the performance of the main PV technologies. The analysis is based on the existing FARMS-NIT model for synthesizing spectra from satellite images and is performed for the three-year period 2017-2019 at 79 European locations grouped into four climatic categories. Spectral variations are quantified using the average photon energy, whereas their impact on PV conversion is expressed through the spectral correction factor. Based on the spectral correction factor, the analyzed locations are clustered into four groups, which provides a basis for extending existing climate classifications used in PV applications.

To enable a more straightforward assessment of the impact of spectral irradiance on PV conversion efficiency, a new model for calculating the spectral correction factor is developed. In constructing the model, the random forest method is used to identify and rank the most relevant atmospheric features, while the model coefficients are determined by ordinary least squares regression. The model is derived from high-quality measurement data collected at three climatically distinct sites: Golden in Colorado (USA), Almería (Spain), and Lindenberg (Germany). Model validation is performed on an independent data set and by comparison with reference models available in the literature. Finally, the dissertation describes the establishment of a platform for continuous measurements of the solar spectrum in Split and presents the measurement results and spectral characterization for the year 2025.

Keywords: Solar radiation, spectrum, model, average photon energy, spectral correction factor, photovoltaic module

Zahvala

Sadržaj

Sažetak	iv
Abstract	v
Zahvala.....	vi
Popis tablica	ix
Popis slika	xii
Popis oznaka i kratica	xviii
1. UVOD.....	1
1.1. Motivacija i pregled dosadašnjih istraživanja	1
1.2. Hipoteze	6
1.3. Očekivani znanstveni doprinosi	7
1.4. Pregled strukture disertacije.....	8
2. UTJECAJ SPEKTRA SUNČEVA ZRAČENJA NA UČINKOVITOST FOTONAPONSKE PRETVORBE	10
2.1. Mjerenje spektra Sunčeva zračenja.....	10
2.2. Spektralni odziv i kvantna učinkovitost.....	15
2.3. Međunarodni standardi za testiranje performansi i energetske ocjenjivanje FN modula .	18
2.3.1. Standard IEC 60904: Karakterizacija FN modula	18
2.3.2. Standard IEC 61853: Energetske ocjenjivanje FN modula	21
2.4. Kvantifikacija spektralnog utjecaja na rad FN modula.....	25
2.4.1. Masa zraka	27
2.4.2. Taložna vodena para.....	30
2.4.3. Indeks vedrine neba	32
2.4.4. Optička dubina aerosola.....	35
2.4.5. Modeliranje spektralnog utjecaja korištenjem izravnih mjerenja spektra.....	36
2.4.6. Usporedba modela spektralne korekcije: metodološki izazovi i praktična ograničenja.....	37
2.5. Modeli za sintetiziranje spektra	39
2.5.1. SMARTS2 model vedrog neba.....	40
2.5.2. Programski alat FARMS-NIT	42
3. METODOLOGIJA ZA PROSTORNO-VREMENSKU SPEKTRALNU ANALIZU.....	44
3.1. Metodološki okvir prostorno-vremenske spektralne analize.....	44
3.1.1. Određivanje optimalnog kuta nagiba FN modula	44
3.1.2. Odabir i karakterizacija FN tehnologija.....	46
3.1.3. Odabir lokacija za analizu.....	50
3.1.4. Sintetiziranje spektra.....	51
3.2. Analiza spektralne varijabilnosti korištenjem prosječne energije fotona.....	51
3.2.1. Prosječni ponderirani spektar europskih lokacija	51
3.2.2. Prostorna analiza prosječne energije fotona.....	55
3.2.3. Vremenska analiza prosječne energije fotona.....	62
3.3. Analiza spektralne varijabilnosti europskih lokacija pomoću faktora spektralne korekcije 67	
3.3.1. Prostorna raspodjela faktora spektralne korekcije na europskoj razini.....	67

3.3.2. Veza između faktora spektralne korekcije i prosječne energije fotona.....	76
3.3.3. Veza između faktora spektralne korekcije i indeksa vedrine neba	81
3.3.4. Vremenska analiza faktora spektralne korekcije	84
3.4. Spektralno utemeljena klasifikacija europskih lokacija	92
4. RAZVOJ I VALIDACIJA MODELA SPEKTRALNE KOREKCIJE S GLOBALNO	
DOSTUPNIM ATMOSFERSKIM VARIJABLAMA	107
4.1. Opći pristup modeliranju faktora spektralne korekcije	107
4.2. Geografske i klimatske značajke mjernih lokacija.....	109
4.2.1. Golden, Colorado, SAD.....	109
4.2.2. Almeria, Španjolska.....	110
4.2.3. Lindenberg, Njemačka.....	111
4.3. Kontrola kvalitete i poboljšanje mjerenja.....	113
4.3.1. Određivanje SF faktora	113
4.3.2. Mjerenje spektralnog ozračenja	114
4.3.3. Ekstrapolacija mjerenog spektralnog ozračenja.....	114
4.3.4. Mjerenje ozračenja.....	116
4.3.5. Specijalizirana mjerenja iz AERONET mreže.....	117
4.4. Metodologija razvoja modela.....	118
4.4.1. Kriteriji kontrole kvalitete mjerenog spektra i ozračenja.....	118
4.4.2. Referentni modeli iz literature	122
4.4.3. Evaluacijske metrike	123
4.4.4. Neuravnoteženost skupova podataka i inverzno frekvencijsko uzorkovanje.....	126
4.4.5. Selekcija značajki	127
4.5. Rezultati peterostruke unakrsne validacije.....	132
4.5.1. Razvijeni model za sve uvjete neba	132
4.5.2. Peterostruka unakrsna validacija za model za sve uvjete neba	133
4.5.3. Razvijeni modeli za uvjete vedrog neba	144
4.5.4. Peterostruka unakrsna validacija za modele vedrog neba.....	146
4.6. Rezultati validacije modela.....	153
4.6.1. Validacija na pojedinačnim lokacijama za model za sve uvjete neba	153
4.6.2. Validacija na neovisnom skupu podataka	163
4.6.4. Validacija na neovisnom skupu podataka	171
4.7. Osvrt na razvijene modele.....	174
5. USPOSTAVA PLATFORME ZA KONTINUIRANO MJERENJE SPEKTRA SUNČEVA	
ZRAČENJA.....	176
5.1. Opis spektralnih mjerenja	177
5.2. Prosječna energija fotona Sunčeva zračenja u Splitu.....	180
5.3. Faktor spektralne korekcije za Split za različite FN tehnologije.....	182
6. ZAKLJUČAK.....	188
LITERATURA.....	191
PRILOG A.....	200
PRILOG B.....	213
ŽIVOTOPIS	213
CURRICULUM VITAE.....	213

Popis tablica

<i>Tablica 2.1 Spektralna područja i pripadne tehnologije detektora [80].</i>	13
<i>Tablica 2.2 Podaci za sintetiziranje AM 1,5 spektra pomoću SMARTS2 programa [92].</i>	19
<i>Tablica 2.3 IEC 61853-1 matrica uvjeta ispitivanja [96,97].</i>	22
<i>Tablica 2.4 Referentni klimatski profili iz standarda IEC 61853-4 [100].</i>	24
<i>Tablica 2.5 Interpretacija vrijednosti K_t indeksa.</i>	33
<i>Tablica 2.6 Predloženi skup jednadžbi za proračun SF vrijednosti za AM-W-AOD model [60].</i>	36
<i>Tablica 2.7 Pregled postojećih modela spektralne korekcije.</i>	39
<i>Tablica 2.8 Prijenosne funkcije u SMARTS2 modelu [92]</i>	40
<i>Tablica 3.1 Razmatrane FN tehnologije.</i>	47
<i>Tablica 3.2 Evaluacijske metrike za četiri klastera</i>	96
<i>Tablica 4.1 Sažetak geografskih, klimatskih i spektralnih značajki odabranih lokacija.</i>	112
<i>Tablica 4.2 Karakteristike korištenih spektroradiometara.</i>	114
<i>Tablica 4.3 Karakteristike CIMEL CE-318 mjernog uređaja.</i>	118
<i>Tablica 4.4 Popis svih korištenih varijabli.</i>	119
<i>Tablica 4.5 Evaluacijske metrike za sve tri lokacije prije i nakon primijenjene kontrole kvalitete podataka.</i>	122
<i>Tablica 4.6 Pregled modela spektralne korekcije.</i>	123
<i>Tablica 4.7 Dobiveni koeficijenti za model za sve uvjete neba.</i>	133
<i>Tablica 4.9 Prosječna vrijednost MAE i RMSE te njihove standardne devijacije i srednje pogreške za predloženi model</i>	140
<i>Tablica 4.10 Prosječna vrijednost MBE te njegove standardne devijacije i srednje pogreške za predloženi model</i>	141
<i>Tablica 4.11 Prosječna vrijednost wMAE i wRMSE te njihove standardne devijacije i srednje pogreške</i>	141
<i>Tablica 4.12 Prosječna vrijednost wMBE te njegove standardne devijacije i srednje pogreške</i>	142
<i>Tablica 4.13 Prosječna vrijednost AE i njegove standardne devijacije i srednje pogreške</i>	142
<i>Tablica 4.14 Prosječne vrijednosti koeficijenata β_0 i β_1 te njihove relativne standardne devijacije i standardne greške.</i>	143
<i>Tablica 4.15 Prosječne vrijednosti koeficijenata β_2 i β_3 te njihove relativne standardne devijacije i standardne greške.</i>	143

<i>Tablica 4.16</i> Prosječne vrijednosti koeficijenta β_4 te njegova relativna standardna devijacija i standardna greška.....	143
<i>Tablica 4.17</i> Predložene analitičke jednadžbe za modele vedrog neba.....	145
<i>Tablica 4.18</i> Dobiveni koeficijenti za model za vedro nebo.	146
<i>Tablica 4.19</i> Prosječna vrijednost wMAE i wRMSE te njihove standardne devijacije i srednje pogreške za modele vedrog neba	151
<i>Tablica 4.20</i> Prosječna vrijednost wMBE te njegove standardne devijacije i srednje pogreške za modele vedrog neba	151
<i>Tablica 4.21</i> Prosječna vrijednost AE i njegove standardne devijacije i srednje pogreške	152
<i>Tablica 4.22</i> Prosječne vrijednosti koeficijenata β_0 i β_1 te njihove relativne standardne devijacije i standardne greške.....	152
<i>Tablica 4.23</i> Prosječne vrijednosti koeficijenata β_2 i β_3 te njihove relativne standardne devijacije i standardne greške.....	153
<i>Tablica 4.24</i> Usporedba evaluacijskih metrika za predloženi model i modele iz literature za validaciju na pojedinačnim lokacijama	156
<i>Tablica 4.25</i> Broj prvih mjesta za evaluacijske metrike svakog od modela za sve tri lokacije .	156
<i>Tablica 4.26</i> Usporedba metrika predloženog modela i modela iz literature	157
<i>Tablica 4.27</i> Standardna devijacija metrike za sve tri promatrane lokacije	158
<i>Tablica 4.28</i> Standardna devijacija metrike za lokacije Golden i Almeriju	159
<i>Tablica 4.29</i> Usporedba godišnjih AE vrijednosti za predloženi model i modele iz literature za validaciju na pojedinačnim lokacijama	160
<i>Tablica 4.30</i> Broj prvih mjesta za godišnji AE svakog od modela za sve tri lokacije	161
<i>Tablica 4.31</i> Tablice SD vrijednosti za AE za sve tri lokacije i dvije lokacije za sva tri modela	161
<i>Tablica 5.1</i> Podaci o lokaciji mjerenja [174].....	176
<i>Tablica 5.2</i> Detalji o provedenim spektralnim mjerenjima.....	178
<i>Tablica 5.3</i> Prosječne mjesečne vrijednosti određenih atmosferskih varijabli.	185
<i>Tablica 5.4</i> Godišnje vrijednosti APE i SF faktora za 9 FN tehnologija.....	187
<i>Tablica A.1</i> Popis svih analiziranih lokacija	200
<i>Tablica A.2</i> Usporedba prosječnog europskog spektra i AM 1,5 spektra.....	202
<i>Tablica A.3</i> Godišnje vrijednosti SF faktora za sve lokacije	202
<i>Tablica A.4</i> Godišnja vrijednost APE za osam analiziranih lokacija za tri promatrane godine	206
<i>Tablica A.5</i> Promjene vrijednosti APE unutar godina - vedro nebo	207

<i>Tablica A.6 Promjene vrijednosti APE unutar godina - svi uvjeti neba</i>	<i>208</i>
<i>Tablica A.7 Klasteri (prvi broj) i subklasteri (drugi broj) kojima pripada svaka lokacija</i>	<i>211</i>
<i>Tablica B.1 Popis značajki korištenih kod metode slučajne šume</i>	<i>213</i>

Popis slika

<i>Slika 2.1 Blok-dijagram spektrometra [75].....</i>	<i>10</i>
<i>Slika 2.2 Upareni MS-710 i MS-712 (lijevo) i MS-711 (desno) [77].....</i>	<i>11</i>
<i>Slika 2.3 Primjer tri mjerenja spektra s MS-710 i MS-712 za različite razine ozračenja [78]. ..</i>	<i>12</i>
<i>Slika 2.4 Primjer tri mjerenja spektra s PSR uređajem za različite razine ozračenja [79].....</i>	<i>12</i>
<i>Slika 2.5 Unutarnji raspored ARBOL radiometra. S desna na lijevo: (a) optički prozor; (b) propusni filter; (c) plano-konveksna leća; (d) zaslon; (e) rupica; (f) tiskana pločica [82].</i>	<i>13</i>
<i>Slika 2.6 Različite vrste filtarskih radiometara [79,82].....</i>	<i>14</i>
<i>Slika 2.7 Spektralni odziv i kvantna efikasnost za a-Si modul korišten u ovom istraživanju.....</i>	<i>16</i>
<i>Slika 2.8 SR i teoretski idealni SR za a-Si modul korišten u ovom istraživanju.....</i>	<i>17</i>
<i>Slika 2.9 QE i teoretski idealni QE za a-Si modul korišten u ovom istraživanju.....</i>	<i>17</i>
<i>Slika 2.10 Standardni spektri: AM 0, AM 1,5G i AM 1,5D [9].....</i>	<i>19</i>
<i>Slika 2.11 Eksperimentalno mjerenje spektralnog odziva [93].</i>	<i>21</i>
<i>Slika 2.12 Proračun energetske ocjene FN modula po standardu 61853-3 [99].</i>	<i>23</i>
<i>Slika 2.13 Zenitni kutovi i pripadajuće mase zraka [41].</i>	<i>28</i>
<i>Slika 2.14 Tri normalizirana spektra s različitim vrijednostima AM izmjerena u Splitu, 4. veljače 2025.</i>	<i>29</i>
<i>Slika 2.15 Odnos između mjesečnih vrijednosti SF i W za CdTe modul.</i>	<i>31</i>
<i>Slika 2.16 Ovisnost SF-a o W i AM za CdTe (lijevo) i poli-Si (desno).</i>	<i>32</i>
<i>Slika 2.17 Sezonske varijacije K_t indeksa za tri lokacije s različitim klimama.</i>	<i>34</i>
<i>Slika 2.18 Usporedba vrijednosti apsolutne pogreške za četiri SF modela.</i>	<i>38</i>
<i>Slika 2.19 Usporedba RMSE vrijednosti za četiri SF modela.</i>	<i>38</i>
<i>Slika 2.20 Usporedba mjerenog i sintetiziranog spektra za vedar dan na lokaciji Split, Hrvatska [22].</i>	<i>41</i>
<i>Slika 2.21 Struktura NSRDB Spectral On-Demand programskog alata [136].</i>	<i>42</i>
<i>Slika 3.1 Tržišna zastupljenost FN tehnologija za 2024. godinu [143].</i>	<i>46</i>
<i>Slika 3.2 Spektralni odzivi FN tehnologija korištenih u analizi.</i>	<i>47</i>
<i>Slika 3.3 Prikaz lokacija korištenih u analizi spektralnih varijacija te pripadajuća klimatska klasifikacija prema Köppen-Geigeru.</i>	<i>50</i>
<i>Slika 3.4 Prosječni spektar ponderiran prema ukupnom ozračenju, standardni AM 1,5 spektar i ekstraterestrički AM 0 spektar.</i>	<i>53</i>
<i>Slika 3.5 Usporedba prosječnog europskog ponderiranog spektra i standardnog AM 1,5 spektra podijeljena po više segmenata valnih duljina.</i>	<i>54</i>

<i>Slika 3.6 Prikaz odnosa prosječne energije fotona i geografske širine za svih 79 lokacija za sve uvjete neba.....</i>	<i>57</i>
<i>Slika 3.7 Prikaz odnosa prosječne energije fotona i geografske širine za svih 79 lokacija za vedro nebo.</i>	<i>58</i>
<i>Slika 3.8 Trenutne, dnevne i mjesečne vrijednosti APE-a za pet lokacija.</i>	<i>59</i>
<i>Slika 3.9 Mjesečne APE vrijednosti za pet promatranih lokacija.....</i>	<i>60</i>
<i>Slika 3.10 Spektar Sunčeva zračenja za tipičan ljetni vedar dan za pet promatranih lokacija. ..</i>	<i>62</i>
<i>Slika 3.11 Spektar Sunčeva zračenja za tipičan zimski vedar dan za pet promatranih lokacija. 62</i>	
<i>Slika 3.12 Mjesečne vrijednosti APE za osam lokacija za sve uvjete neba.</i>	<i>63</i>
<i>Slika 3.13 Mjesečne vrijednosti APE za osam lokacija za vedro nebo.</i>	<i>63</i>
<i>Slika 3.14 Toplinska mapa koeficijenta varijacije za sve uvjete neba (lijevo) i za uvjete vedrog neba (desno).</i>	<i>64</i>
<i>Slika 3.15 Višegodišnji mjesečni koeficijent varijacije APE-a za sve uvjete neba (lijevo) i vedro nebo (desno).</i>	<i>65</i>
<i>Slika 3.16 Razlika koeficijenta varijacije APE između vedrog i svih uvjeta neba.</i>	<i>65</i>
<i>Slika 3.17 Godišnje APE vrijednosti za sve uvjete neba za svih osam promatranih lokacija.</i>	<i>66</i>
<i>Slika 3.18 Godišnje APE vrijednosti za vedro nebo za svih osam promatranih lokacija.</i>	<i>66</i>
<i>Slika 3.19 Međugodišnje varijacije APE-a za osam promatranih lokacija za sve uvjete neba. ..</i>	<i>67</i>
<i>Slika 3.20 Međugodišnje varijacije APE-a za osam promatranih lokacija za vedro nebo.....</i>	<i>67</i>
<i>Slika 3.21 Mapa Europe s SF vrijednostima za a-Si (gore), perovskit (sredina) i CdTe (dolje) za sve uvjete neba (lijevo) i vedro nebo (desno).</i>	<i>69</i>
<i>Slika 3.22 Mapa Europe s SF vrijednostima za PERC, poli-Si, HJT i CZTSSe (s vrha prema dolje) za sve uvjete neba (lijevo) i vedro nebo (desno).</i>	<i>70</i>
<i>Slika 3.23 Raspodjela godišnje SF vrijednosti za a-Si, CdTe i Perovskit (svi uvjeti neba - plava boja, vedro nebo - narančasta boja).</i>	<i>73</i>
<i>Slika 3.24 Raspodjela godišnje SF vrijednosti za PERC, poli-Si, HJT i CZTSSe (svi uvjeti neba - plava boja, vedro nebo - narančasta boja).</i>	<i>73</i>
<i>Slika 3.25 Mjesečne SF vrijednosti za a-Si (gore), CdTe (sredina) i mono-Si HJT (dolje).</i>	<i>75</i>
<i>Slika 3.26 Odnos satnih vrijednosti SF i APE za a-Si () i mono-Si PERC.</i>	<i>77</i>
<i>Slika 3.27 Odnos trenutnih vrijednosti SF-a i APE-a za a-Si i mono-Si PERC s koloriranjem prema ukupnom ozračenju.</i>	<i>78</i>
<i>Slika 3.28 Dva spektra s istom vrijednosti APE, jedan za vedro nebo, drugi za oblačno.</i>	<i>78</i>
<i>Slika 3.29 Odnos između mjesečnih ponderiranih vrijednosti SF-a i APE-a za sve uvjete neba (lijevo) i vedro nebo (desno) za a-Si (gore) i CdTe (dolje).</i>	<i>79</i>

<i>Slika 3.30 Odnos između mjesečnih ponderiranih vrijednosti SF-a i APE-a za sve uvjete neba (lijevo) i vedro nebo (desno) za mono-Si PERC (gore) i mono-Si HJT (dolje).</i>	80
<i>Slika 3.31 Faktor korelacije između mjesečnih ponderiranih vrijednosti SF-a i APE-a za sve uvjete neba (lijevo) i za vedro nebo (desno).</i>	81
<i>Slika 3.32 Usporedba spektra za vedar i oblačan dan.</i>	82
<i>Slika 3.33 Usporedba spektara za vedar i oblačan dan po valnim vrpčama.</i>	82
<i>Slika 3.34 Odnos trenutnih SF i K_t vrijednosti.</i>	83
<i>Slika 3.35 Mjesečne vrijednosti SF-a za tri promatrane godine za a-Si.</i>	84
<i>Slika 3.36 Mjesečne vrijednosti SF-a za tri promatrane godine za CdTe.</i>	85
<i>Slika 3.37 Mjesečne vrijednosti SF-a za tri promatrane godine za mono-Si HJT.</i>	86
<i>Slika 3.38 Toplinske mape unutargodišnjih varijacija SF-a za a-Si (gore), CdTe (sredina) i mono-Si HIT (dolje).</i>	87
<i>Slika 3.39 Godišnje ponderirane vrijednosti SF-a za a-Si.</i>	89
<i>Slika 3.40 Godišnje ponderirane vrijednosti SF-a za CdTe.</i>	89
<i>Slika 3.41 Godišnje ponderirane vrijednosti SF-a za mono-Si HJT.</i>	90
<i>Slika 3.42 Međugodišnje razlike SF-a za a-Si.</i>	90
<i>Slika 3.43 Međugodišnje razlike SF-a za CdTe.</i>	91
<i>Slika 3.44 Međugodišnje razlike SF-a za mono-Si HJT.</i>	91
<i>Slika 3.45 Pseudokod za prvu fazu postupka klasteriranja.</i>	97
<i>Slika 3.46 Pseudokod za drugu fazu postupka klasteriranja.</i>	98
<i>Slika 3.47 Klasteriranje za vedro nebo za perovskit.</i>	103
<i>Slika 3.48 Mjesečne vrijednosti SF-a za klastere za perovskit.</i>	103
<i>Slika 3.49 Histogram APE razdiobe za klastere za perovskit.</i>	103
<i>Slika 3.50 Klasteriranje za vedro nebo za CdTe.</i>	104
<i>Slika 3.51 Mjesečne vrijednosti SF-a za klastere za CdTe.</i>	104
<i>Slika 3.52 Histogram APE razdiobe za klastere za CdTe.</i>	104
<i>Slika 3.53 Klasteriranje za vedro nebo za mono-Si HJT.</i>	105
<i>Slika 3.54 Mjesečne vrijednosti SF-a za klastere za mono-Si HJT.</i>	105
<i>Slika 3.55 Histogram APE razdiobe za klastere za mono-Si HJT.</i>	105
<i>Slika 3.56 Prosječne mjesečne vrijednosti SF-a za klastere za perovskit (gore), CdTe (sredina) i mono-Si HJT (dolje).</i>	106
<i>Slika 4.1 Metodološki okvir razvoja modela spektralne korekcije.</i>	108
<i>Slika 4.2 Golden, Colorado, SAD.</i>	110
<i>Slika 4.3 Almeria, Španjolska.</i>	111

<i>Slika 4.4</i> Lindenberg, Njemačka.	112
<i>Slika 4.5</i> Mjerenje spektra WISER I sustavom na lokacijama Golden (lijevo) i Almeria (desno).	114
<i>Slika 4.6</i> Mjerenje G u Almeriji.	116
<i>Slika 4.7</i> Mjerenje G (lijevo) te D i B_n (desno) u Lindenbergu.	116
<i>Slika 4.8</i> Mjerenje G (lijevo) te D i B_n (desno) u Goldenu.	117
<i>Slika 4.9</i> Usporedba G s piranometra i ukupnog integriranog ozračenja dobivenog iz spektra Sunčeva zračenja za Golden za nefiltrirane (lijevo) i filtrirane (desno) podatke.	121
<i>Slika 4.10</i> Usporedba G s piranometra i ukupnog integriranog ozračenja dobivenog iz spektra Sunčeva zračenja za Almeriju za nefiltrirane (lijevo) i filtrirane (desno) podatke.	121
<i>Slika 4.11</i> Usporedba G s piranometra i ukupnog integriranog ozračenja dobivenog iz spektra Sunčeva zračenja za Lindenberg za nefiltrirane (lijevo) i filtrirane (desno) podatke.	122
<i>Slika 4.12</i> Skup podataka za modeliranje po lokacijama.	127
<i>Slika 4.13</i> Primjer regresije metodom slučajne šume.	129
<i>Slika 4.14</i> Toplinska mapa važnosti značajki za sve uvjete neba.	133
<i>Slika 4.15</i> MAE predloženog modela i modela iz literature.	134
<i>Slika 4.16</i> wMAE predloženog modela i modela iz literature.	135
<i>Slika 4.17</i> Srednja kvadratna pogreška predloženog modela i modela iz literature.	135
<i>Slika 4.18</i> wRMSE predloženog modela i modela iz literature.	136
<i>Slika 4.19</i> MBE predloženog modela i modela iz literature.	137
<i>Slika 4.20</i> wMBE predloženog modela i modela iz literature.	137
<i>Slika 4.21</i> Prosjek evaluacijskih metrika po svim analiziranim FN tehnologijama.	138
<i>Slika 4.22</i> Godišnja vrijednost AE za a -Si, perovskit i CdTe.	139
<i>Slika 4.23</i> Godišnja vrijednost AE za tehnologije od kristalnog silicija, CZTSSe i CIGS.	139
<i>Slika 4.24</i> Toplinska mapa važnosti značajki za vedro nebo.	145
<i>Slika 4.25</i> Ponderirana srednja apsolutna pogreška predloženog modela za vedro nebo i modela iz literature.	147
<i>Slika 4.26</i> Ponderirana srednja kvadratna pogreška predloženog modela za vedro nebo i modela iz literature.	148
<i>Slika 4.27</i> wMBE predloženog modela za vedro nebo i modela iz literature.	148
<i>Slika 4.28</i> Prosjek ponderiranih pogrešaka po FN tehnologijama za predloženi model vedrog neba i Caballerov model.	149
<i>Slika 4.29</i> Godišnja vrijednost AE za a -Si, perovskit i CdTe za modele vedrog neba.	150

<i>Slika 4.30 Godišnja vrijednost AE za tehnologije od kristalnog silicija, CZTSSe i CIGS za modele vedrog neba.</i>	150
<i>Slika 4.31 Odnos wMAE (gore lijevo), wRMSE (gore desno), wMBE (dolje lijevo) i AE (dolje desno) sa K_t.</i>	162
<i>Slika 4.32 wMAE predloženog modela i modela iz literature.</i>	164
<i>Slika 4.33 wRMSE predloženog modela i modela iz literature.</i>	164
<i>Slika 4.34 wMBE predloženog modela i modela iz literature.</i>	165
<i>Slika 4.35 Godišnja vrijednost AE za a-Si, perovskit i CdTe.</i>	166
<i>Slika 4.36 Godišnja vrijednost AE za tehnologije od kristalnog silicija, CZTSSe i CIGS.</i>	167
<i>Slika 4.37 wMAE za predloženi model vedrog neba i modele iz literature.</i>	168
<i>Slika 4.38 wRMSE za predloženi model vedrog neba i modele iz literature.</i>	168
<i>Slika 4.39 wMBE za predloženi model vedrog neba i modele iz literature.</i>	169
<i>Slika 4.40 Godišnja vrijednost AE za a-Si, perovskit i CdTe za modele vedrog neba.</i>	170
<i>Slika 4.41 Godišnja vrijednost AE za tehnologije od kristalnog silicija, CZTSSe i CIGS za modele vedrog neba za validaciju na lokaciji Almeria.</i>	170
<i>Slika 4.42 wMAE za predloženi model vedrog neba i modele iz literature.</i>	171
<i>Slika 4.43 wRMSE za predloženi model i modele iz literature.</i>	172
<i>Slika 4.44 wMBE za predloženi model vedrog neba i modele iz literature.</i>	173
<i>Slika 4.45 Godišnja vrijednost AE za a-Si, perovskit i CdTe za modele vedrog neba za nezavisnu validaciju.</i>	173
<i>Slika 4.46 Godišnja vrijednost AE za tehnologije od kristalnog silicija, CZTSSe i CIGS za modele vedrog neba za validaciju na neovisnom skupu podataka.</i>	174
<i>Slika 5.1 MS-711 na krovu FESB-ove zgrade.</i>	177
<i>Slika 5.2 Tri mjerena spektra za različite periode godine u Splitu za 2025. godinu (MS-711).</i>	178
<i>Slika 5.3 Usporedba integriranog ozračenja s MS-711 i ozračenja s piranometra - nefiltrirani podaci.</i>	179
<i>Slika 5.4 Usporedba integriranog ozračenja s MS-711 i ozračenja s piranometra - filtrirani podaci.</i>	179
<i>Slika 5.5 Godišnja distribucija APE vrijednosti za sve uvjete neba.</i>	180
<i>Slika 5.6 Godišnja distribucija APE vrijednosti za vedro nebo ($K_t > 0,85$).</i>	181
<i>Slika 5.7 Trenutne, dnevne, mjesečne i godišnja APE vrijednost u Splitu za 2025. godinu.</i>	182
<i>Slika 5.8 Mjesečne APE vrijednosti za Split za 2025. godinu.</i>	182
<i>Slika 5.9 Faktor spektralne korekcije za a-Si, Perovskit i CdTe.</i>	184
<i>Slika 5.10 Faktor spektralne korekcije za tehnologije kristalnog silicija, CIGS i CZTSSe.</i>	184

<i>Slika 5.11 3D prikaz vrijednosti mase zraka za Split za cijelu godinu.</i>	185
<i>Slika 5.12 Mjesečne vrijednosti AM i K_t.</i>	186
<i>Slika A.1 Odnos mjesečnih vrijednosti SF i APE za sve uvjete neba (lijevo) i vedro nebo (desno) za CZTSSe</i>	209
<i>Slika A.2 Odnos mjesečnih vrijednosti SF i APE za sve uvjete neba (lijevo) i vedro nebo (desno) za mono-Si PERT</i>	209
<i>Slika A.3 Odnos mjesečnih vrijednosti SF i APE za sve uvjete neba (lijevo) i vedro nebo (desno) za poli-Si Al-BSF</i>	209
<i>Slika A.4 Odnos mjesečnih vrijednosti SF i APE za sve uvjete neba (lijevo) i vedro nebo (desno) za perovskit</i>	210
<i>Slika A.5 Odnos godišnjih vrijednosti SF i APE za sve uvjete neba (gore) i vedro nebo (dolje)</i>	210

Popis oznaka i kratica

FN	fotonaponski
EES	elektroenergetski sustav
c-Si	kristalni silicij
a-Si	amorfni silicij
CdTe	kadmij telurid
CIGS	bakar indij galij selenid
CZTSSe	bakar cink kositar sumpor selenid
AM	masa zraka
AM_a	tlačno korigirana masa zraka
W	taložna vodena para
CSI	indeks vedrog neba (engl. <i>clear-sky index</i>)
K_t	indeks vedrine neba (engl. <i>clearness index</i>)
AOD	optička dubina aerosola (engl. <i>aerosol optical depth</i>)
CPV	koncentrirani FN sustavi
APE	prosječna energija fotona
ε	dubina apsorpcijskog pojasa vode
B_n	izravno normalno ozračenje (engl. <i>beam normal irradiance</i>)
UV	ultraljubičasto područje
NIR	blisko infracrveno područje
SWIR	kratkovalno infracrveno područje
AE	Ångströmov eksponent
SR	spektralni odziv (engl. <i>spectral response</i>)
QE	kvantna efikasnost (engl. <i>quantum efficiency</i>)
h	Planckova konstanta
c	brzina svjetlosti
λ	valna duljina
STC	standardni testni uvjeti (engl. <i>standard test conditions</i>)
IEC	Međunarodna elektrotehnička komisija (engl. <i>International Electrotechnical Commission</i>)
SMM	faktor neusklađenosti spektra (engl. <i>spectral mismatch factor</i>)
E	spektralno ozračenje
E_{ref}	spektralno ozračenje referentnog spektra

E_{norm}	normalizirano spektralno ozračenje
SR	spektralni odziv
SR_{ref}	spektralni odziv referentnog uređaja
G	ukupno ozračenje
G_{meas}	izmjereno ukupno ozračenje
G_{eff}	spektralno korigirano ukupno ozračenje
I_{sc}	struja kratkog spoja
$I_{sc,ref}$	struja kratkog spoja pri referentnom spektru
J	gustoća struje
LIC	uvjeti niskog ozračenja (engl. <i>low-irradiance conditions - LIC</i>)
HTC	uvjeti visoke temperature (engl. <i>high-temperature conditions - HTC</i>)
NOCT	nominalna radna temperatura ćelije (engl. <i>nominal operating cell temperature - NOCT</i>)
$P_{mod,j}$	izlazna snaga modula za svaki sat u godini
$P_{dc,0}$	snaga modula pri standardnim testnim uvjetima
T_{mod}	temperatura modula
A_{mod}	površina modula
η	učinkovitost FN modula
$CSEER$	klimatski specifična energetska ocjena
SF	faktor spektralne korekcije (engl. <i>spectral factor</i>)
Φ	gustoća toka fotona
H_v	prividna visinska skala vodene pare
ρ_v	gustoća vodene pare
e_s	zasićeni tlak vodene pare
G_{sc}	solarna konstanta ozračenja
G_{cs}	ukupno ozračenje u uvjetima potpuno vedrog neba
T	temperatura zraka
RH	relativna vlažnost zraka
PCTTI	doprinos pojedinih valnih intervala ukupnoj energiji (engl. <i>percentage contribution to total irradiance - PCTTI</i>)
DBI	Davies-Bouldin indeks
CHI	Calinski-Harabasz indeks
WCV	unutar-klasterska varijanca
CV	koeficijent varijacije

WCSS

metoda lakta

RF

metoda slučajne šume (engl. *random forest*)

1. UVOD

1.1. Motivacija i pregled dosadašnjih istraživanja

Ubrzani razvoj i povećanje udjela obnovljivih izvora energije u postojećem elektroenergetskom sustavu (EES) neophodno je kako bi se smanjile štetne emisije CO₂ iz fosilnih goriva. Rekordna mjesečna koncentracija CO₂ od 430,5 ppm zabilježena je u svibnju 2025. godine [1]. Fotonaponski (FN) sustavi, kao jedan od najperspektivnijih obnovljivih izvora energije, imaju važnu ulogu u ovoj tranziciji zahvaljujući izravnoj pretvorbi Sunčeve energije u električnu.

Industrija FN sustava prošla je kroz veliku transformaciju tijekom posljednja dva desetljeća, obilježenu značajnim napretkom u energetske učinkovitosti i smanjenjem troškova [2]. Veliki pad cijena prvenstveno je rezultat tehnoloških inovacija, povećanja proizvodnih kapaciteta, posebno zahvaljujući azijskim proizvođačima, i posljedične prekomjerne ponude na tržištu. Globalni FN sektor bilježi iznimnu dinamiku rasta, potaknut strateškim inicijativama poput REPowerEU plana (600 GW instaliranog FN kapaciteta do 2030.) [3]. U Sjedinjenim Američkim Državama u 2025. očekuje se instaliranje približno 32 GW novih FN sustava. U 2024. godini FN sustavi generirali su nešto manje od 7% globalne električne energije, te će igrati glavnu ulogu u postizanju cilja koji je postavljen na COP28 (28. Konferenciji Ujedinjenih naroda o klimatskim promjenama) o utrostručenju kapaciteta obnovljivih izvora energije do 2030. godine [4]. Do tada se očekuje da njihov udio u proizvodnji električne energije poraste na 17%, dok će prema projekcijama do 2035. nadmašiti ugljen i plin kao vodeći izvor električne energije, čineći između 25% i 35% proizvodnje [5].

Iako FN tehnologija donosi niz prednosti - ekološku održivost, ekonomsku konkurentnost i fleksibilnu primjenu - njena učinkovitost ostaje pod izravnim utjecajem vremenskih prilika i geografskih karakteristika lokacije. Upravo ta inherentna varijabilnost proizvodnje čini razvoj preciznih modela za predviđanje i optimizaciju rada FN modula i sustava u cjelini glavnim preduvjetom za njihovu pouzdanu integraciju u moderni EES. Precizno modeliranje važno je za izradu pouzdanih simulacija već u fazi projektiranja, kontinuirano praćenje rada sustava te izradu preciznih predviđanja proizvodnje. Veliki istraživački projekti kao što su Sandia National Laboratories PV Performance Modeling Project i COST Action PEARL PV pokazali su da su detaljno modeliranje i validacija neophodni za napredak u procjeni rada FN sustava i smanjenje neizvjesnosti rezultata [6,7].

Glavni faktori koji utječu na rad FN modula su ozračenje, temperatura modula i spektar Sunčeva zračenja. Dok su utjecaji ozračenja i temperature modula detaljno istraženi i dobro kvantificirani, spektralni sastav Sunčeva zračenja predstavlja faktor čiji je utjecaj manje istražen unatoč njegovoj fundamentalnoj važnosti. Svaka FN tehnologija pokazuje specifičnu spektralnu osjetljivost, što znači da promjene u raspodjeli zračenja po valnim duljinama izravno utječu na konačnu pretvorbu energije. Nedostatak pouzdanih podataka o spektru Sunčeva zračenja stoga uvodi sustavnu nesigurnost u postojeće modele. To ograničava njihovu pouzdanost i opravdava potrebu za naprednijim pristupima modeliranju. Nedovoljno istraživanje spektralnih svojstava Sunčeva zračenja u kontekstu rada FN modula proizlazi iz više međusobno povezanih čimbenika. Jedan od ključnih razloga je činjenica da se kristalni silicij (c-Si), kao dominantan materijal u FN industriji, smatra relativno neosjetljivim na spektralne varijacije [8]. Ovo uvriježeno mišljenje, zajedno s potrebom za standardizacijom i usporedivošću rezultata, dovelo je do širokog prihvatanja referentnog spektra AM 1,5 definiranog u IEC 60904-3 kao industrijskog i znanstvenog standarda [9]. Već tada su rezultati nekih istraživanja sugerirali da je važno uključiti utjecaj spektralnih varijacija u modeliranje rada FN sustava [10–13]. Iako korištenje referentnog spektra pojednostavljuje testiranje, time se ne uzima u obzir stvarna spektralna promjenjivost koja ovisi o raznim atmosferskim varijablama i solarnoj geometriji. Međutim, s naglim povećanjem instaliranog kapaciteta FN sustava i njihovim sve značajnijim utjecajem na EES, te paralelnim uvođenjem novih materijala od kojih su mnogi znatno osjetljiviji na spektralne promjene od silicija, istraživanje spektra dobiva iznimnu važnost. Unatoč tome, složenost i visoka cijena mjerenja spektra i dalje predstavljaju značajnu prepreku, jer je potrebno koristiti sofisticirane mjerne instrumente koje treba redovito umjeravati, što ih ograničava na mali broj specijaliziranih laboratorija. Najpoznatiji laboratoriji te vrste su National Laboratory of the Rockies - NLR (Golden, Colorado, SAD), Sandia National Laboratories - SNL (Albuquerque, New Mexico, SAD), Fraunhofer ISE (Freiburg, Njemačka), MatER-PUCP (Lima, Peru) i Joint Research Centre - JRC (Brussels, Belgija) [2,14–17]. Sva navedena ograničenja rezultirala su time da se spektralni podaci u mnogim slučajevima zamjenjuju jednostavnim aproksimacijama ili potpuno izostavljaju, što je posebno evidentno u popularnim simulacijskim alatima kao što su PV*SOL i PVSYS [18–22]. Ovakvo stanje dodatno je usporilo razvoj i implementaciju naprednijih spektralnih modela.

Brojne studije potvrdile su značajan utjecaj spektralnih karakteristika na rad različitih FN tehnologija. Istraživanja usmjerena na kvantifikaciju spektralnog utjecaja pokazala su da c-Si

općenito pokazuje najmanju osjetljivost, s godišnjim spektralnim varijacijama u rasponu od $\pm 1\%$ do 5% [23–29]. Ipak, na kraćim vremenskim skalama, poput tjednih i mjesečnih razdoblja, moguće su znatno veće varijacije čija amplituda može doseći i 14% [30]. Tankoslojni moduli, kao što su tehnologije temeljene na amorfnom siliciju (a-Si), kadmij teluridu (CdTe), bakar indij galij selenidu (CIGS), perovskitima i bakar cink kositar sumpor selenidu (CZTSSe), pokazuju izraženu spektralnu ovisnost, bilježeći godišnje varijacije u iznosu od -4% do $+9\%$ ovisno o geografskoj lokaciji i širini zabranjenog pojasa [31,32]. Nasuprot tome, naprednije tehnologije poput kombinacije perovskita i silicija te višespojnih tandem struktura pokazuju znatno veće spektralne osjetljivosti s gubicima u rasponu $8-25\%$ [33]. Paralelno, radovi fokusirani na razvoj i validaciju modela pokazali su da zanemarivanje spektralnih efekata može dovesti do pogrešaka u simulacijama do 15% , što nedvosmisleno potvrđuje da su spektralne varijacije značajan čimbenik u radu FN modula [34,35]. Ovu činjenicu dodatno potkrepljuju i nedavne studije, koje su pokazale da integriranje spektralnih podataka u modele FN sustava može poboljšati točnost procjena proizvodnje za $5-15\%$ [36,37].

Spektralna karakterizacija podrazumijeva analizu i kvantifikaciju utjecaja Sunčeva spektra na rad FN modula, s ciljem poboljšanja točnosti modeliranja u realnim uvjetima. U praksi se koriste dva komplementarna pristupa: prvi se temelji na zamjenskim atmosferskim varijablama koje su vezane za solarnu geometriju, stanje naoblake, količinu atmosferskih čestica i sl., dok drugi koristi parametre izravno izvedene iz mjerenja spektra Sunčeva zračenja. Metode bazirane na zamjenskim varijablama omogućuju procjenu spektralnog utjecaja bez potrebe za izravnim mjerenjima spektra, što ih čini praktično primjenjivima na velikom broju lokacija. Za razliku od toga, varijable dobivene izravnim analizom spektra daju preciznije rezultate, što je uvjetovano primjenom naprednijih eksperimentalnih metoda.

Nedostatak opsežnih mjerenja spektra Sunčeva zračenja potaknuo je razvoj metoda koje spektralni utjecaj procjenjuju posredno, korištenjem dostupnih atmosferskih varijabli. Zbog dokazano jake korelacije sa spektralnim promjenama u uvjetima vedrog neba (engl. *clear-sky conditions*), najčešće je kao zamjenska varijabla korištena masa zraka (engl. *air mass - AM*) [38–41]. Ovaj pristup je implementiran i u poznatom modelu za procjenu rada FN sustava (engl. *Sandia Array PV Performance Model - SAPM*) koji je razvijen u ranije spomenutom američkom istraživačkom laboratoriju SNL [42,43]. Međutim, masa zraka ne uzima u obzir utjecaj atmosferskih sastojaka poput vodene pare ili oblaka. Atmosferska taložna vodena para (engl. *precipitable water vapour - W*) značajno utječe na spektralni sastav Sunčeva zračenja, posebno u infracrvenom području. Najprije je razvijen model koji povezuje utjecaj spektra na rad FN

modula na temelju vrijednosti W , a kasnija validacija na novijoj generaciji CdTe modula pokazala je dobro slaganje s mjerenim podacima [44,45]. Iako se model pokazao korisnim za CdTe module, njegova primjenjivost na druge FN tehnologije je ograničena, što je dovelo do toga da nije našao širu primjenu u industriji [46].

Zbog evidentnih nedostataka modela s jednom varijablom, razvijeni su napredniji modeli koji kombiniraju više značajki. Spectral 2.0 model, primjerice, koristi i AM i W , što omogućuje primjenu na širi spektar tehnologija (CdTe i c-Si) [47]. Daljnji napredak predstavlja Spectral 3.0 model, koji je dodatno uveo i indeks vedrog neba (engl. *clear-sky index - CSI*) [48]. Indeks vedrog neba generiran je na temelju satelitskih snimki kako bi eksplicitno obuhvatio utjecaj oblaka. Oblaci modificiraju spektralnu raspodjelu zračenja kroz selektivno raspršenje i apsorpciju ovisno o valnoj duljini, pri čemu njihove karakteristike (tip, debljina, pokrivenost) uvode dodatnu varijabilnost [49–52]. Iako je ovaj model, temeljen na simuliranom spektru, prema literaturi značajno smanjio pogreške predviđanja, valja napomenuti da nije napravljena njegova validacija na stvarnim podacima. Slično tome, za kvantifikaciju utjecaja oblaka na spektralnu raspodjelu Sunčeva zračenja često se koristi tzv. indeks vedrine neba, K_t (engl. *clearness index*). K_t služi kao pokazatelj stupnja atmosferske prozirnosti i promjena u prijenosu Sunčeve energije kroz atmosferu. Primjena K_t omogućila je razvoj jednostavnih pristupa za sve uvjete neba (engl. *all-sky conditions*) poput PVSPEC modela, koji kombinacijom K_t i AM postiže poboljšanu točnost u odnosu na AM model [53]. Sličan pristup korištenjem istih varijabli, ali s drugačijim oblikom modela, razvijen je i u radu [54].

Ograničenja jednostavnih modela prevladavaju se u novijim istraživanjima uključivanjem dodatnih atmosferskih varijabli. Značajan utjecaj optičke dubine aerosola (engl. *aerosol optical depth - AOD*) na spektralne promjene sve se više ističe u novijim radovima [55–58]. Za sveobuhvatniji model, AOD se kombinira s masom zraka i taložnom vodenom parom. Jedan model koji koristi upravo te tri varijable razvijen je specifično za primjenu u koncentriranim FN sustavima (engl. *concentrator photovoltaics - CPV*), u kojima se najčešće koriste višespojni FN moduli [59]. Kasnije je taj pristup proširen i na jednospojne FN module tako da je za svaki pojedini materijal definiran odgovarajući skup jednadžbi [60]. Ovi modeli otežavaju praktičnu primjenu jer, iako se određeni atmosferski podaci za AOD i W mogu preuzeti iz globalnih baza podataka, oni su dostupni samo za ograničen broj lokacija [61–63]. Međutim, valja napomenuti kako je usporedba AM - W - AOD modela napravljena samo s AM modelom, dok je usporedba s naprednijim modelima koji uključuju dvije varijable izostala. Dodatno, važno je naglasiti kako

su ovi modeli razvijeni i primjenjivi isključivo za uvjete vedrog neba, što predstavlja njihov glavni nedostatak.

Paralelno s ovim neizravnim pristupom modeliranju spektralnog utjecaja, razvijene su i metode temeljene na izravnim spektralnim značajkama. Metoda prosječne energije fotona (engl. *average photon energy - APE*) daje višu točnost i u vedrim i u oblačnim uvjetima (naročito za a-Si i CdTe module) [64,65]. Kombinacija *APE* s varijablama poput dubine apsorpcijskog pojasa vode (ϵ) pokazala se još preciznijom, ali također najviše za a-Si i CdTe FN module [66,67]. Zbog svoje sposobnosti da sažme kompleksne spektralne podatke u jedan parametar, *APE* je stekao veliku popularnost u području solarne energije i često se u istraživanjima koristi za predstavljanje spektra Sunčeva zračenja [68–71]. Glavni nedostatak ovog pristupa, unatoč njegovoj točnosti i primjenjivosti u različitim vremenskim uvjetima, leži u činjenici da zahtijeva precizna spektralna mjerenja [72].

Postojeći pristupi istraživanju spektralnih svojstava Sunčeva zračenja u kontekstu rada FN modula imaju bitan nedostatak - ne omogućuju integraciju spektralnih karakteristika kao kriterija u postojeće klimatske klasifikacije za FN primjene. Iako su u razvijene detaljne klasifikacije klimatskih zona prema FN tehnologijama, spektralne značajke nisu uključene kao eksplicitni faktor, pa se pri odabiru tehnologije za određenu zonu spektralni efekti sustavno zanemaruju [73]. Što se tiče postojećih modela spektralne korekcije, detaljna analiza literature otkriva nekoliko nedostataka. Prije svega, velika većina modela primjenjiva je isključivo za uvjete vedrog neba, bez mogućnosti primjene na sve uvjete neba, što je problematično za realnu primjenu. Nadalje, modeli su često validirani na podacima prikupljenima tijekom samo jedne godine i na jednoj lokaciji, čime im je ograničena pouzdanost. Većina modela pokriva ograničen broj tehnologija (najčešće c-Si, a-Si i CdTe), dok za novije tehnologije nisu validirani. Dodatno, neki modeli razvijani su i testirani isključivo kroz simulacije, bez usporedbe s mjerenjima, što njihovu točnost u stvarnim uvjetima rada čini neprovjerenom. Zbog ovih ograničenja, spektralne karakteristike nisu prepoznate kao ključni čimbenik u međunarodnim standardima i klimatskim klasifikacijama za FN sustave, što otežava optimizaciju izbora FN tehnologije prema lokalnim klimatskim uvjetima.

U okviru ove doktorske disertacije provedena je analiza utjecaja spektralnog sastava Sunčeva zračenja na učinkovitost različitih FN tehnologija kroz novi metodološki okvir. Prvi dio istraživanja obuhvaća primjenu prostorno-vremenskog pristupa u analizi spektralnih varijacija koji omogućuje detaljnu karakterizaciju spektralnih efekata kroz različite europske klimatske regije, uz vremensku pokrivenost od intra-godišnjih varijacija do višegodišnjih trendova. Ova

analiza temelji se na naprednim satelitskim podacima visoke prostorno-vremenske rezolucije te eksperimentalno određenim spektralnim odzivima reprezentativnih FN materijala.

Središnji dio istraživanja usmjeren je na razvoj novog modela spektralne korekcije temeljenog na dostupnim atmosferskim varijablama. Cilj ovog dijela istraživanja bio je razviti model spektralne korekcije primjenjiv za sve uvjete neba na širokom spektru FN tehnologija, uključujući monokristalni (mono-Si) i polikristalni (poli-Si) silicij te tankoslojne tehnologije (a-Si, CdTe, CIGS, perovskit, CZTSSe). Treći dio istraživanja obuhvaća mjerenja spektra Sunčeva zračenja u Splitu tijekom cijele 2025. godine te analizu prikupljenih podataka. Posebnu važnost ovog dijela rada predstavlja činjenica da se radi o prvom sustavnom mjerenju spektra Sunčeva zračenja na teritoriju Republike Hrvatske, čime se uspostavlja referentna baza za buduća istraživanja.

1.2. Hipoteze

Fizikalno je jasno da spektar Sunčeva zračenja ima značajan utjecaj na rad FN modula, ali iz pregleda literature može se uočiti da su istraživanja tog utjecaja puno manje zastupljena od istraživanja utjecaja ozračenja i temperature. Uočeno je da u postojećem istraživačkom okviru i dalje postoje određeni nedostaci, osobito u razvoju i primjeni modela spektralne korekcije. Kvalitativno kontrolirani mjereni i sintetizirani podaci o spektralnom ozračenju nisu dostupni u istoj mjeri kao podaci o ukupnom ozračenju, pri čemu su uzroci tog nedostatka detaljnije opisani u prethodnom poglavlju. Povezivanje utjecaja spektralnih varijacija na rad FN tehnologija i klimatskih uvjeta na različitim lokacijama stoga se smatra vrijednim doprinosom postojećem znanju. U ovoj doktorskoj disertaciji predložen je novi pristup modeliranju utjecaja spektra Sunčeva zračenja korištenjem dostupnih atmosferskih varijabli, čime se nastoji unaprijediti procjena stvarnih radnih uvjeta FN modula. Stoga su postavljene sljedeće hipoteze:

1. Moguće je razviti model spektralne korekcije za proračun utjecaja spektra Sunčeva zračenja na rad FN sustava, koji koristi atmosferske varijable dostupne na velikom broju lokacija i kojim se može proširiti primjena spektralne korekcije u procjeni rada FN modula tijekom cijele godine i za sve vremenske uvjete.
2. Korištenjem dvodimenzionalnog prostorno-vremenskog pristupa, satelitskih spektralnih podataka visoke rezolucije i mjerenih spektralnih odziva različitih FN materijala, moguće je precizno kvantificirati utjecaj Sunčeva spektra na rad različitih tipova FN modula u različitim klimatskim područjima.

1.3. Očekivani znanstveni doprinosi

Očekivani znanstveni doprinosi ovog rada su sljedeći:

1. Novi model spektralne korekcije kojim se proširuje mogućnost modeliranja utjecaja spektra Sunčeva zračenja na rad FN modula na lokacije koje pripadaju različitim klimatskim pojasevima. Predloženi model temeljit će se atmosferskim varijablama koje su dostupne za velik broj lokacija, pri čemu će omogućiti precizno modeliranje utjecaja spektra Sunčeva zračenja na učinkovitost rada FN modula tijekom cijele godine i za različite vremenske uvjete. Postojeći modeli često koriste određene atmosferske varijable koje se mjere na ograničenom broju lokacija, zbog čega je ograničena njihova primjena i integracija u alate za modeliranje. S druge strane, mnogi modeli oslanjaju se samo na varijable koje su relevantne isključivo za dane vedrog neba, poput mase zraka (*AM*) i optičke dubine aerosola (*AOD*), čime se unosi značajna nepreciznost u cjelogodišnje modeliranje rada FN sustava.
2. Prijedlog nove metodologije za procjenu utjecaja spektra Sunčeva zračenja na rad FN tehnologija u različitim klimatskim regijama Europe, temeljene na dvodimenzionalnom prostorno-vremenskom pristupu. Ova metodologija temeljit će se na spektru Sunčeva zračenja koji je modeliran korištenjem atmosferskih varijabli dobivenih iz višegodišnjih satelitskih snimaka sa satnom rezolucijom za cijelu Europu. Time se omogućuje detaljna i prostorno utemeljena analiza utjecaja spektra na rad FN modula u različitim europskim klimatskim uvjetima kao i analiza vremenske varijacije utjecaja spektra unutar jedne godine, ali i kroz više godina procjenom kako se utjecaj za iste mjesec/godišnja doba mijenja za istu lokaciju tijekom više godina. Također, to će omogućiti proširenje postojeće klasifikacije klima za FN primjene dodavanjem spektralnog utjecaja koji je trenutno zanemaren.
3. Uspostava platforme za kontinuirano mjerenje spektra Sunčeva zračenja na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje na (FESB) u Splitu te razvoj odgovarajuće programske podrške za kvantificiranje utjecaja spektra na rad FN modula. Eksperimentalni dio istraživanja temeljit će se na mjerenjima pomoću preciznog spektrometra u rasponu valnih duljina od 280 do 1050 nm, što predstavlja ključno spektralno područje za različite FN tehnologije. Prikupljeni spektralni podaci bit će analizirani kroz dvije komplementarne metodologije spektralne karakterizacije: Metodologija neovisna o FN tehnologiji koristit će prosječnu energiju fotona (*APE*) kao

ključni parametar za kvantifikaciju energetskog sadržaja spektra. Ovaj pristup omogućuje objektivnu karakterizaciju spektralnih varijacija tijekom vremena bez ovisnosti o specifičnim svojstvima pojedinih FN modula. Metodologija kojom se u razmatranje uzima i specifičnost pojedine FN tehnologije primjenjivat će faktor spektralne korekcije (engl. *spectral factor - SF*) uz eksperimentalno određene spektralne odzive različitih FN tehnologija (mono-Si, poli-Si, a-Si, CdTe, CIGS, CZTSSe, perovskit). Na taj način omogućit će se precizna kvantifikacija utjecaja lokalnih spektralnih karakteristika na rad specifičnih tipova FN modula.

1.4. Pregled strukture disertacije

Doktorska disertacija podijeljena je na šest poglavlja. U prvom poglavlju dan je uvod u temu istraživanja, uključujući motivaciju i osnovne ciljeve rada. Opisana su najvažnija istraživanja koja se bave utjecajem spektra Sunčeva zračenja na rad FN modula. Također, definirane su hipoteze istraživanja, očekivani znanstveni doprinosi te je dan pregled strukture disertacije.

Drugo poglavlje daje teorijsku podlogu potrebnu za razumijevanje ostatka rada. Opisane su metode mjerenja spektra Sunčeva zračenja. Prikazani su programski alati za sintetiziranje spektra te koncepti spektralnog odziva i kvantne učinkovitosti FN modula. Dan je pregled relevantnih međunarodnih standarda te je napravljen kritički pregled postojećih modela spektralne korekcije.

U trećem poglavlju je metodologija za istraživanje prostorno-vremenskih varijacija spektra Sunčeva zračenja u Europi, kao i utjecaja tih varijacija na učinkovitost različitih tehnologija FN modula. Opisani su kriteriji odabira 79 reprezentativnih lokacija prema Köppen-Geiger klasifikaciji, određivanje optimalnog kuta nagiba te korištenje FARMS-NIT modela i NSRDB Spectral On-Demand baze za generiranje satnih vrijednosti spektralnog ozračenja. Prikazan je odabir i karakterizacija osam FN tehnologija korištenih u analizi te je definirana procedura izračuna *APE-a* i *SF-a*. U nastavku su prikazani rezultati prostorno-vremenske analize, uključujući sezonske i međugodišnje varijacije. Napravljen je i spektralno utemeljena klasifikacija europskih lokacija.

U četvrtom poglavlju opisan je razvoj modela spektralne korekcije. Predložen je hibridni pristup koji kombinira metodu slučajne šume (engl. *random forest*) za odabir najrelevantnijih fizikalnih značajki s razvojem analitičkog modela kalibriranog metodom najmanjih kvadrata. U poglavlju je opisan razvoj modela za sve uvjete neba i zasebno za uvjete vedrog neba za različite FN tehnologije. Koeficijenti razvijenih modela određeni su primjenom peterostruke

unakrsne validacije na temelju visokokvalitetnih mjernih podataka s tri različite lokacije. Predloženi modeli su validirani na zasebnom skupu podataka s tri razmatrane lokacije, kao i na dodatnom jednogodišnjem skupu podataka.

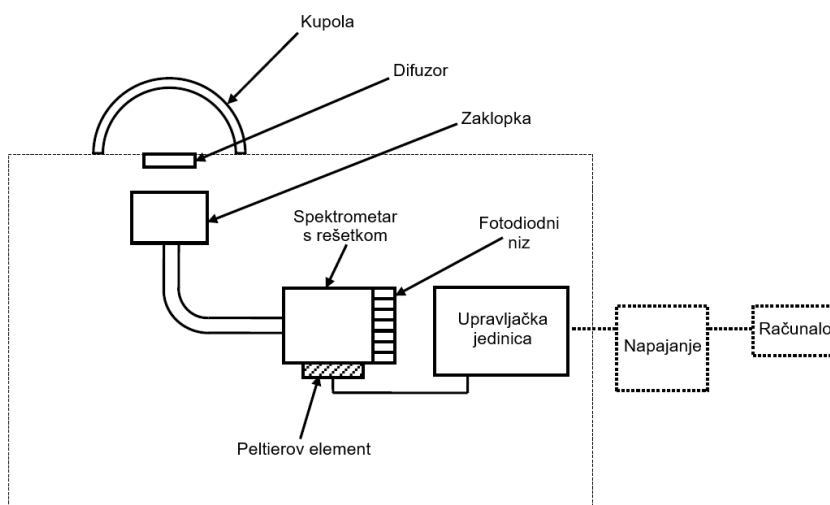
Uspostava mjerne postaje za kontinuirano mjerenje spektra Sunčeva zračenja prikazana je u petom poglavlju. Opisana je korištena mjerna oprema i kontrola kvalitete podataka. Predstavljani su obrađeni mjerni podaci napravljeni tijekom 2025. godine. Izračunate su vrijednosti parametara *APE* i *SF* za devet FN tehnologija.

U šestom poglavlju izneseni su zaključci provedenog istraživanja. Sažeto su prezentirani ključni rezultati prostorno-vremenske spektralne analize, razvoja modela spektralne korekcije te eksperimentalnog dijela rada. Poglavlje završava raspravom o ograničenjima istraživanja te prijedlozima za budući rad.

2. UTJECAJ SPEKTRA SUNČEVA ZRAČENJA NA UČINKOVITOST FOTONAPONSKE PRETVORBE

2.1. Mjerenje spektra Sunčeva zračenja

Mjerenja spektra Sunčeva zračenja važna su za preciznu procjenu njegova utjecaja na rad FN modula. Postoje dva načina mjerenja spektra Sunčeva zračenja. Prvi način je izravno mjerenje na svim valnim duljinama koje mjerni uređaj može pokriti. Za ovaj pristup koriste se spektrometri, uređaji koji omogućuju istovremeno mjerenje ozračenja na velikom broju pojedinačnih valnih duljina. Na slici 2.1 prikazan je blok-dijagram spektrometra s glavnim optičkim i elektroničkim dijelovima. Njihov rad temelji se na monokromatorima (prizma ili rešetka), optičkim elementima koji razdvajaju svjetlost prema valnim duljinama. Osim toga, potrebni su i elektronički senzori kao što su fotodiode ili CCD (engl. *charge coupled device*), a podaci se prikupljaju i analiziraju za svaku valnu duljinu posebno. Ulazno zračenje hvata se optičkom kupolom s difuzorom koji instrumentu daje hemisfernu osjetljivost i ispravlja kutnu ovisnost. Svjetlost prolazi kroz ulazni otvor i optičko vlakno do monokromatora koji razdvaja svjetlost prema valnim duljinama. Kolimacijski i fokusirajući optički elementi (zakrivljena zrcala) usmjeravaju paralelni snop svjetlosti na senzor, koji obično ima 1024-2048 piksela. Svaki piksel odgovara uskoj spektralnoj zoni (0,4-1 nm), pri čemu se kod mjerenja nižih intenziteta koristi hlađenje senzora Peltierovim elementom. Upravljačka jedinica upravlja mehaničkom zaklopkom, temperaturnom stabilizacijom i pozicioniranjem optičkih dijelova. Podaci se digitaliziraju i prenose na računalo za valnu i radiometrijsku kalibraciju [74].

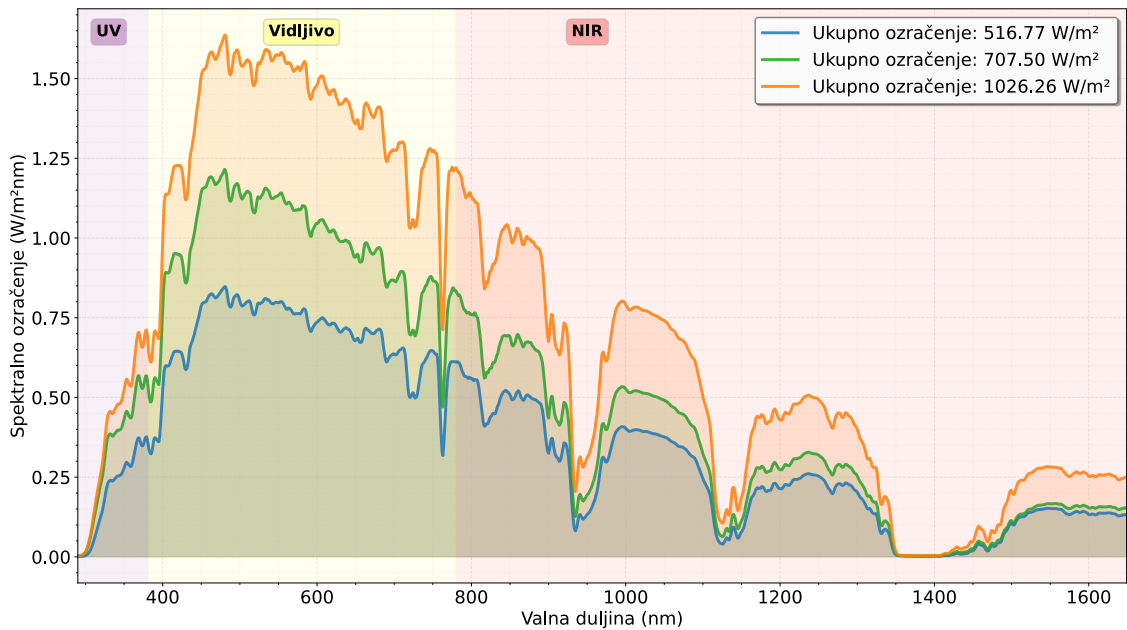


Slika 2.1 Blok-dijagram spektrometra [75].

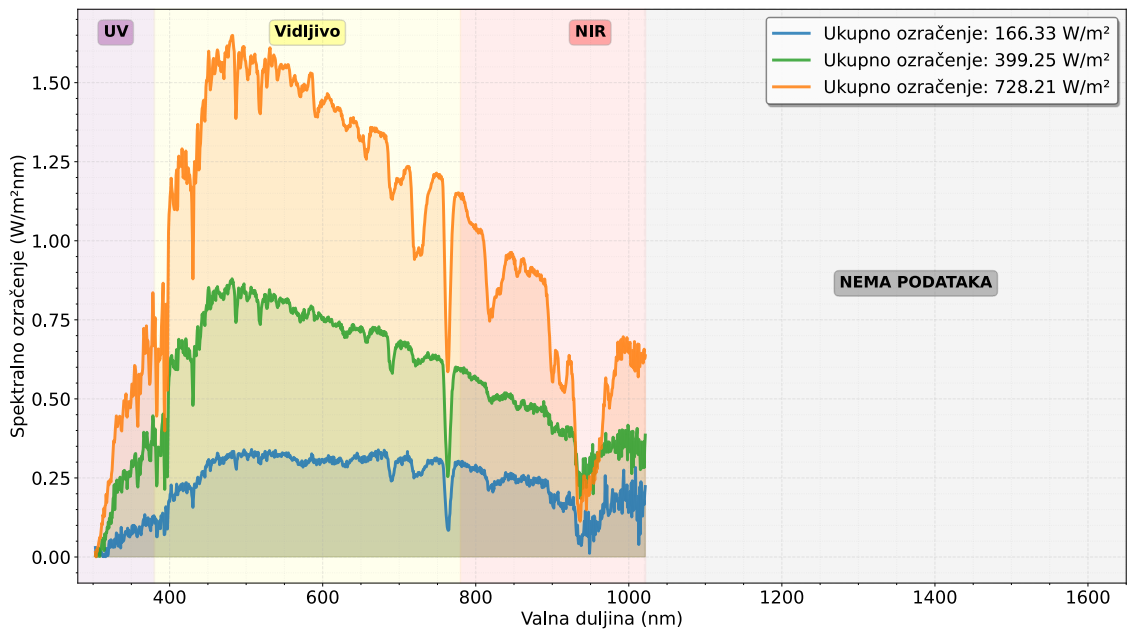
Za pokrivanje glavnog spektralnog područja važnog za FN primjene (290-1650 nm), što uključuje ultraljubičasto (engl. *ultraviolet - UV*), vidljivo, blisko infracrveno zračenje (engl. *near infrared - NIR*) i dio kratkovalnog infracrvenog zračenja (engl. *short-wavelength infrared - SWIR*), potrebna su dva spektrometri zbog ograničenja senzora. Prvi uređaj pokriva UV, vidljivo i dio NIR područja (290-1050 nm), a drugi pokriva NIR područje (900-1650 nm ili šire) [75]. Kao konkretan primjer, na slici 2.2 (lijevo) prikazani su upareni spektrometri MS-710 i MS-712 koji zajedno čine WISER I sustav i pokrivaju 290-1650 nm. Na istoj slici desno prikazan je MS-711 za mjerenje izravnog normalnog spektralnog ozračenja (engl. *beam normal irradiance - Bn*). Na većini mjernih postaja koristi se jedan spektrometar sa silicijskim senzorom koji pokriva područje od 300 do 1050 nm. Naime, zahvaljujući širokoj dostupnosti visokokvalitetnih silicijskih detektora moguće je postići visoku točnost u tom rasponu valnih duljina. Taj raspon je u većini slučajeva dovoljan jer velik broj FN tehnologija ima spektralni odziv upravo u tom području valnih duljina, ali u tom slučaju je važno imati uparena mjerenja s piranometra na istoj lokaciji kako bi imali podatak o ukupnom ozračenju. U slučaju kada se raspoloživo samo spektrometrom s ograničenim rasponom od 300 do 1050 nm, a spektralni odziv FN modula prelazi taj raspon, moguće je koristiti određene metode ekstrapolacije koje omogućuju proširivanje izmjerenog spektra u potreban širi spektralni raspon i koje se temelje na poznavanju spektralnih karakteristika Sunčeva zračenja i atmosferskih uvjeta u graničnim područjima. Na slici 2.3 prikazana su tri mjerenja spektra dobivena pomoću dvaju uparenih spektrometara MS-710 i MS-712 koji zajedno pokrivaju područje 290-1650 nm, pri čemu je zbog šire optičke funkcije proreza (FWHM reda veličine 5-7 nm) i numeričke obrade spektralna krivulja glatka. Nasuprot tome, na slici 2.4 prikazan je spektar izmjeren spektrometrom tipa PSR, u užem rasponu 300-1020 nm, ali s boljom spektralnom rezolucijom (1,5-6 nm i korakom oko 0,7 nm). Takav instrument jasno reproducira Fraunhoferove apsorpcijske linije, a dio izvan mjernog opsega instrumenta je nepoznat [76].



Slika 2.2 Upareni MS-710 i MS-712 (lijevo) i MS-711 (desno) [77].



Slika 2.3 Primjer tri mjerenja spektra s MS-710 i MS-712 za različite razine ozračenja [78].



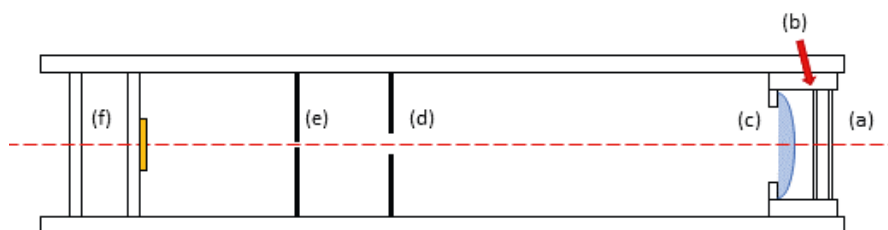
Slika 2.4 Primjer tri mjerenja spektra s PSR uređajem za različite razine ozračenja [79].

Mjerenja u IR području moguće je proširiti do 2500 nm korištenjem kombinacije različitih tipova detektora kao što su indij-galij-arsenidni (InGaAs) ili olovo-sulfidni (PbS) senzori. Kod ovih mjerenja moguće je postići spektralnu razlučivost od približno 10 do 20 nm u ovom proširenom spektralnom rasponu. Pregled spektralnih područja i pripadnih detektorskih tehnologija prikazan je u tablici 2.1 [80]. Moderni spektrometri pokazuju određenu osjetljivost na promjene temperature, osobito u IR području, što zahtijeva primjenu izolirajućih kućišta i ranije spomenutog hlađenja senzora za održavanje stabilnosti mjerenja.

Tablica 2.1 Spektralna područja i pripadne tehnologije detektora [80].

Spektralno područje	Valne duljine (nm)	Tehnologija detektora
UV	200 - 400	UV pojačani silicijski fotodiodni senzori
Vidljivo	400 - 700	Silicijski fotodiodni i CCD senzori
NIR	700 - 1000	Silicijski fotodiodni i CCD senzori
Vidljivo i NIR	400 - 1000	Raspon niza silicijskih fotodioda
NIR+SWIR	1000 - 2500	Raspon niza PbS senzora
NIR+SWIR-1	1000 - 1890	Raspon niza InGaAs senzora
NIR+SWIR-2	1890 - 2500	Raspon niza proširenih InGaAs senzora
Puni raspon	300 - 3300	Termopilni piranometar

Drugi pristup mjerenju spektra Sunčeva zračenja temelji se na korištenju filtarske radiometrije, gdje se spektralno ozračenje mjeri na samo nekoliko odabranih, specifičnih valnih duljina umjesto mjerenja cijeloga spektra [81]. U tom slučaju koriste se optički filtri uske spektralne propusnosti (obično 1-10 nm) montirani ispred preciznih radiometrijskih detektora, pri čemu svaki filtar propušta samo jako uzak raspon valnih duljina iz ukupnog spektra. Primjer unutarnje optike takvog sustava prikazan je na slici 2.5 [82]. Instrumenti ovoga tipa nazivaju se filtarski radiometri ili fotometri i mjere samo u nekoliko diskretnih spektralnih kanala. Dobar primjer je CIMEL Electronique CE-318 [83], koji je standard u svjetskoj mreži AERONET [84]. Taj uređaj mjeri u devet kanala (smještenih u rasponu 340-1640 nm) koristeći silicijske i InGaAs detektore. Slično, SolarSIM-G i SolarSIM-D2 koriste niz optičkih filtara za mjerenje odabranih valnih duljina koje omogućuju računalnu rekonstrukciju spektra od 280 do 1200 nm ili čak do 4000 nm [85]. Odabir valnih duljina za mjerenje temelji se na poznavanju kako različite atmosfere varijable utječu na određena područja spektra Sunčeva zračenja.



Slika 2.5 Unutarnji raspored ARBOL radiometra. S desna na lijevo: (a) optički prozor; (b) propusni filtar; (c) plano-konveksna leća; (d) zaslona; (e) rupica; (f) tiskana pločica [82].

Dokazano je da učinci atmosferskih varijabli na različita spektralna područja nisu jednaki, nego su uglavnom koncentrirani na uske apsorpcijske pojaseve [86]. Ova svojstva omogućuju odabir specifičnih valnih duljina koje su posebno osjetljive na promjene atmosferskih varijabli. Prednost ovoga pristupa je značajna jednostavnost i robusnost jer su filtarski radiometri mehanički jednostavniji od spektrometara. To ih čini otpornijima na terensku upotrebu i zahtijevaju rjeđe umjeravanje.

Vrijednost podataka dobivenih filtarskim radiometrima proizlazi iz njihove obrade primjenom naprednih matematičkih modela i algoritama, koji diskretne mjerene vrijednosti povezuju s poznatim fizikalnim i atmosferskim varijablama. Na taj način rekonstruira se spektar u rasponu 280-4000 nm. Najčešće korištene metode uključuju regresijske algoritme, interpolacijske tehnike te inverzne modele prijenosa zračenja, koji na temelju mjerenja u nekoliko spektralnih kanala omogućuju procjenu spektralne raspodjele u širem rasponu. Također, ova mjerenja omogućuju određivanje specifičnih atmosferskih varijabli, poput optičke dubine aerosola (*AOD*), taložne vodene pare (*W*) i sličnih veličina. Na primjer, CIMEL CE-318 omogućuje određivanje *AOD*-a, *AE*-a (Ångströmov eksponent - parametar inverzno proporcionalan s prosječnom veličinom aerosola) i *W* iz omjera izravne i raspršene komponente Sunčeva zračenja. Na slici 2.6 prikazano je više tipova filtarskih radiometara.



Slika 2.6 Različite vrste filtarskih radiometara [79,82].

Ograničenja filtarske radiometrije odnose se na činjenicu da interpolacija i ekstrapolacija iz samo nekoliko kanala mogu unijeti sustavne pogreške ako se koriste neprikladni modeli ili ako su atmosferski uvjeti značajno različiti od onih za koje su modeli kalibrirani. Filtarski radiometri ne mogu postići istu spektralnu razlučivost kao spektroradiometri (tipično 10-30 nm nasuprot 1-8 nm), što je važno za razvoj preciznih modela spektralne korekcije. Izravna mjerenja spektroradiometrom omogućuju dobivanje detaljne i pouzdane spektralne raspodjele. Nedostatak im je što su oprema i umjeravanje znatno skuplji. Filtarski radiometri, sa svojim nižim troškovima, robusnošću i dugoročnom stabilnošću, prikladni su za kreiranje šire mreže lokacija s istovjetnim i kontinuiranim mjerenjima. Međunarodne usporedbe uređaja za mjerenje spektra potvrdile su da oba pristupa mjerenju spektra Sunčeva zračenja postižu zadovoljavajuće rezultate za određene FN primjene [87,88]. Izbor pristupa ovisi o specifičnim zahtjevima preciznosti, spektralne razlučivosti i dostupnosti resursa. U ovoj disertaciji korištena su isključivo mjerenja sa spektroradiometra na temelju preporuke Dr. Christiana A. Gueymarda (osobna komunikacija, prosinac 2025.), koji je priznati svjetski autoritet u području mjerenja i modeliranja Sunčeva zračenja. Usporedba Solar-SIM-G radiometra i EKO WISER I spektroradiometara pokazala je da su mjerenja radiometra unutar granica sekundarnog standarda, (odstupanja do 10 W/m^2) pa je bolje izbjeći ova mjerenja za izradu preciznih modela spektralne korekcije [89].

2.2. Spektralni odziv i kvantna učinkovitost

Spektralni odziv (engl. *spectral response* - *SR*) opisuje kako FN modul reagira na svjetlost različitih valnih duljina te je jedna od ključnih karakteristika koja određuje učinkovitost fotonaponske pretvorbe. Po definiciji, *SR* predstavlja omjer fotogenerirane struje i snage upadnog zračenja u funkciji valne duljine i izražava se u jedinici A/W [90]. *SR* je usko povezan s kvantnom učinkovitošću (engl. *quantum efficiency* - *QE*). *QE* daje broj generiranih elektrona koji sudjeluju u fotogeneriranoj struji po upadnom fotonu [91]. Različite FN tehnologije imaju različite krivulje *SR-a* zbog razlika u širini zabranjenog pojasa i optičkim svojstvima. Spektralni odziv je pokazatelj kako FN ćelija reagira na različite oblike spektra Sunčeva zračenja, koji variraju ovisno o atmosferskim uvjetima, dobu dana i godišnjem dobu. Idealni spektralni odziv ograničen je na većim valnim duljinama zbog nemogućnosti poluvodiča da apsorbira fotone čija je energija manja od širine zabranjenog pojasa. Ova granica je ista kao ona koja se susreće u krivuljama *QE*. Primjerice, spektralni odziv za amorfni silicij koji je korišten u ovom istraživanju prikazan je na slici 2.7, a idealna kvantna učinkovitost istog FN materijala na slici 2.8. Međutim, za razliku od kvadratnog oblika krivulja kvantne učinkovitosti, spektralni odziv

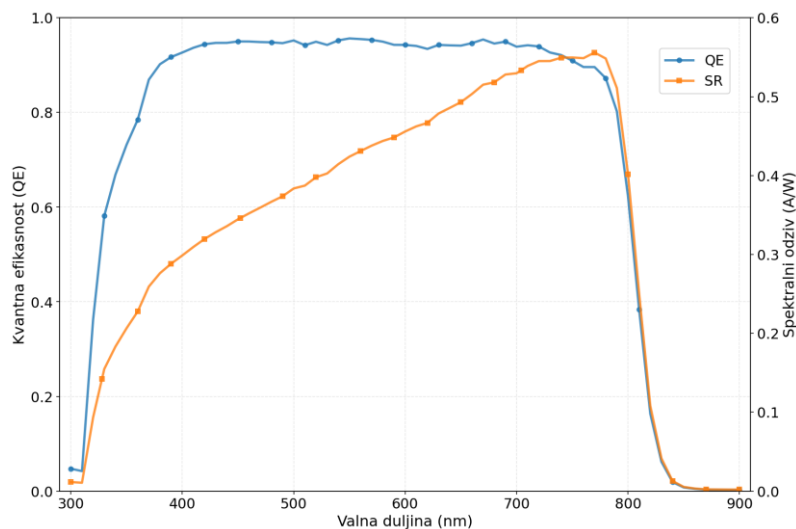
se smanjuje i pri kraćim valnim duljinama fotona, kao što je prikazano na primjeru amornog silicija na slici 2.9. Višak energije potreban za pobuđivanje elektrona iz valentnog u vodljivi pojas gubi se u vidu topline, što povećava vibracije kristalne rešetke. Nemogućnost potpunog iskorištavanja upadne energije pri kraćim valnim duljinama i nemogućnost apsorpcije pri dužim valnim duljinama predstavlja značajan gubitak snage u FN modulima.

U praksi se SR najprije mjeri izravno, a zatim se iz njega izračunava QE , koji se koristi kao standardna referentna veličina u karakterizaciji FN uređaja. Mjerenje se provodi izlaganjem FN ćelije monokromatskoj svjetlosti različitih valnih duljina i mjerenjem generirane struje kratkog spoja. Za mnoge primjene (posebno u znanosti i razvoju materijala), češće se prikazuje i analizira upravo kvantna efikasnost, jer ona izravno pokazuje omjer broja fotogeneriranih elektrona prema broju upadnih fotona i omogućuje bolje razumijevanje gubitaka u različitim dijelovima ćelije. Spektralni odziv je povezan s QE preko sljedećeg izraza:

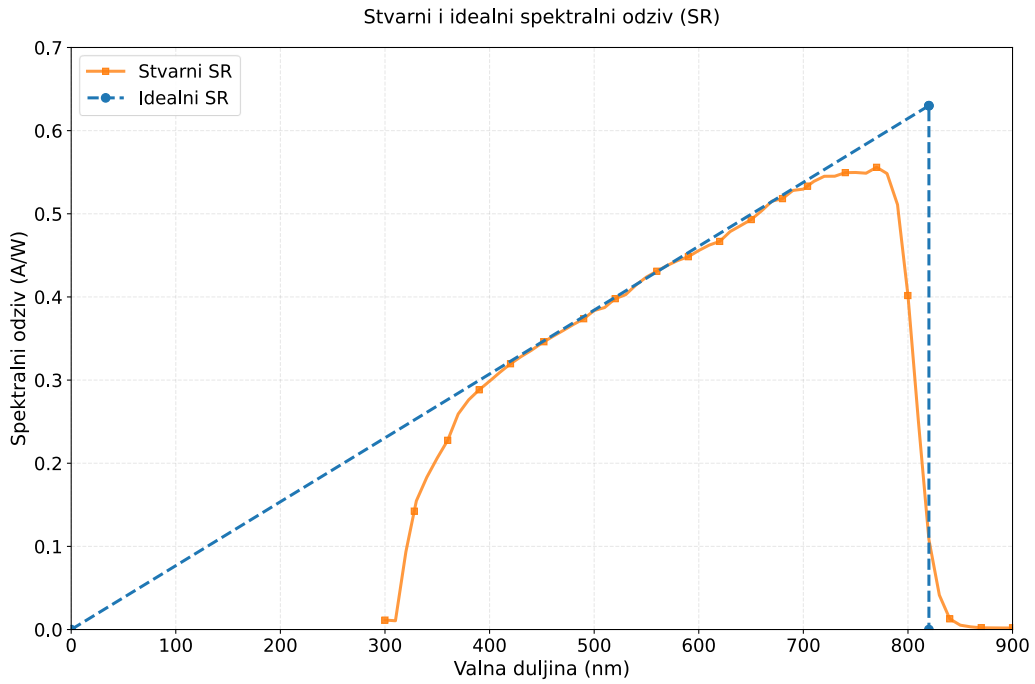
$$SR(\lambda) = QE(\lambda) \cdot \frac{q\lambda}{hc} \quad (2.1)$$

gdje je h Planckova konstanta, c brzina svjetlosti, a λ valna duljina upadnog zračenja. Zbog preglednosti i lakše izravne vizualne usporedbe različitih FN tehnologija, spektralni odzivi su najčešće normalizirani na jediničnu vrijednost. To je moguće napraviti korištenjem formule primijenjene u [32]:

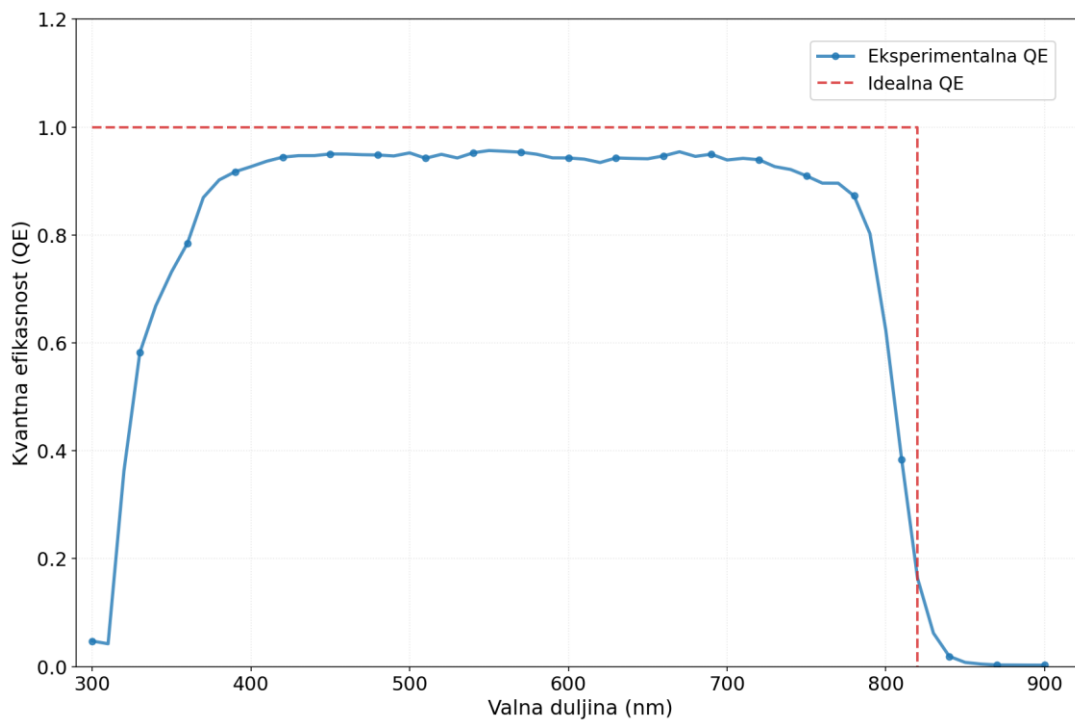
$$SR_{norm}(\lambda) = \frac{SR(\lambda)}{\max[SR(\lambda)]} = \frac{QE(\lambda) \cdot \frac{q\lambda}{hc}}{\max\left[QE(\lambda) \cdot \frac{q\lambda}{hc}\right]} = \frac{QE(\lambda) \cdot \lambda}{\max[QE(\lambda) \cdot \lambda]} \quad (2.2)$$



Slika 2.7 Spektralni odziv i kvantna efikasnost za a -Si modul korišten u ovom istraživanju.



Slika 2.8 SR i teoretski idealni SR za a-Si modul korišten u ovom istraživanju.



Slika 2.9 QE i teoretski idealni QE za a-Si modul korišten u ovom istraživanju.

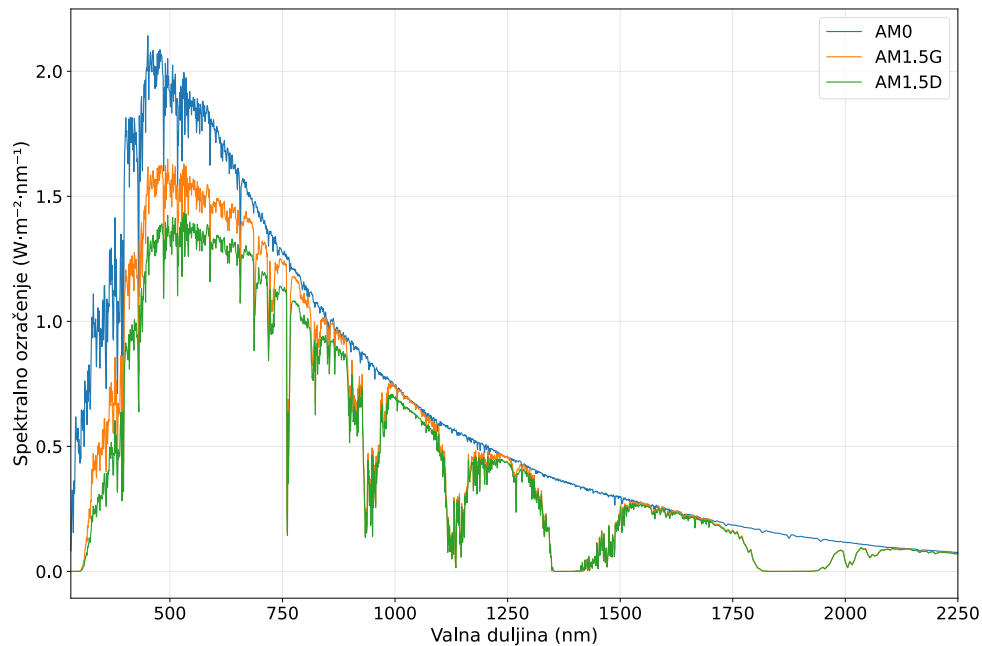
2.3. Međunarodni standardi za testiranje performansi i energetska ocjenjivanje FN modula

2.3.1. Standard IEC 60904: Karakterizacija FN modula

Na početku pregleda standarda važno je spomenuti seriju standarda IEC 60904. Ona predstavlja primarni regulatorni okvir za mjerenje, testiranje i karakterizaciju FN modula na međunarodnoj razini. Njome su obuhvaćena mjerenja strujno-naponskih karakteristika, zahtjevi za referentne uređaje, mjerna načela za FN module s referentnim spektralnim podacima, postupci za uspostavljanje sljedivosti umjeravanja, određivanje ekvivalentne temperature modula, izračun faktora spektralne neusklađenosti, mjerenja spektralnog odziva, mjerenja performansi solarnih simulatora, mjerenja linearnosti, mjerenja inicijalne svjetlosno inducirane degradacije, kvalifikacije modularnih spojnih elemenata, postupaka elektroluminiscentnog snimanja i smjernica za IR termografsko snimanje.

FN moduli ocjenjuju se prema njihovoj snazi pri standardnim testnim uvjetima definiranim standardom IEC 60904-3 (engl. *standard test conditions - STC*): ozračenje iznosa 1000 W/m^2 , temperatura FN modula od $25 \text{ }^\circ\text{C}$ i standardni referentni spektar AM 1,5 [9]. U prethodnim poglavljima spomenuti referentni spektar AM 1,5 bitan je koncept u području Sunčeve energije i FN sustava. Na slici 2.10 prikazan je standardni AM 1,5 spektar zajedno s ekstraterestričkim AM 0 spektrom koji predstavlja Sunčev spektar na samom ulazu u Zemljinu atmosferu. Spektar AM 1,5G (u daljnjem tekstu AM 1,5 ili referentni spektar) predstavlja ukupni standardni spektar (koji uključuje izravnu i raspršenu komponentu zračenja) važan za procjenu rada klasičnih FN modula i detaljno je opisan u ovom poglavlju. Spektar označen s AM 1,5D je izravni normalni spektar koji je od posebne važnosti za koncentrirane FN sustave koji koriste optičke koncentratore i mogu iskoristiti samo izravnu komponentu Sunčeva zračenja. Broj 1,5 u nazivu označava da zrake prolaze 1,5 puta duži put nego pri okomitom upadu (zenitni kut Sunca od $48,19^\circ$). Standard IEC 60904-3 definira AM 1,5 spektar i postupke mjerenja performansi FN modula te ga industrija i istraživači koriste za usporedbu različitih FN materijala. Spektar pokriva područje od 280 do 4000 nm s ukupnim ozračenjem od 1000 W/m^2 , a oblik mu je određen apsorpcijom (voda, CO_2 , ozon, aerosoli) i Rayleighovim raspršenjem (masa zraka). Standardni AM 1,5 spektar sintetizira se pomoću SMARTS2 programa (opisan poglavlju 2.5.1), koji modelira atmosferski prijenos zračenja kroz složene algoritme koji uzimaju u obzir molekularnu apsorpciju, Rayleighovo raspršenje i učinke aerosola polazeći od ekstraterestričkog AM 0 spektra. U tablici 2.2 navedeni su najvažniji podaci potrebni za sintezu referentnog spektra u SMARTS2 programu. Važno je naglasiti da stvarni spektar jako često

značajno odstupa od referentnog. To znači da se pretvorba energije tijekom radnog vijeka FN modula uglavnom odvija u spektralnim uvjetima koji se razlikuju od STC. S obzirom da FN sustavi zauzimaju sve veći udio u ukupnom EES-u, utjecaj spektralnih varijacija dobiva na važnosti. Važno je pronaći način kako zamijeniti referentni spektar preciznim proračunom utjecaja stvarnog spektra na rad FN modula.



Slika 2.10 Standardni spektri: AM 0, AM 1,5G i AM 1,5D [9].

Tablica 2.2 Podaci za sintetiziranje AM 1,5 spektra pomoću SMARTS2 programa [92].

Parametar	Vrijednost
Masa zraka	1,5
Zenitni kut Sunca	48,19 °
Stupac ozona u atmosferi	0,34 atm-cm
Taložna vodena para	1,42 cm
Atmosferski tlak	1013,25 mbar
AOD (500 nm)	0,084
Spektralni raspon	280-4000 nm
Albedo tla	0,2
Ukupno ozračenje	1000 W/m ²

Osim referentnog spektra, za detaljniju karakterizaciju FN modula važni su i standardi IEC 60904-7 i IEC 60904-8. Oni se bave utjecajem spektralnih svojstava na ispitivanje FN modula te daju okvir za pouzdaniju procjenu njihova rada u različitim spektralnim uvjetima. Standard IEC 60904-7 propisuje postupak za korekciju pogreške spektralne neusklađenosti koja nastaje tijekom testiranja FN uređaja zbog razlike između testnog spektra i referentnog spektra, te zbog razlike između spektralnih odziva referentnog uređaja i ispitivanog uređaja. Ova korekcija je važna za smanjenje mjerne nesigurnosti. Faktor spektralne neusklađenosti (engl. *spectral mismatch factor* - *SMM*) izračunava se prema sljedećoj formuli:

$$SMM = \frac{\int E(\lambda)SR(\lambda)d\lambda}{\int E_{ref}(\lambda)SR(\lambda)d\lambda} \cdot \frac{\int E_{ref}(\lambda)SR_{ref}(\lambda)d\lambda}{\int E(\lambda)SR_{ref}(\lambda)d\lambda} \quad (2.3)$$

gdje je $E_{ref}(\lambda)$ spektralno ozračenje referentnog spektra, $E(\lambda)$ spektralno ozračenje mjenog testnog spektra, $SR_{ref}(\lambda)$ spektralni odziv referentnog uređaja, a $SR(\lambda)$ spektralni odziv ispitivanog uređaja. Sve integracije provode se u cijelom spektralnom rasponu gdje su odgovarajuće veličine različite od nule. Efektivno ozračenje koje generira istu struju kratkog spoja u ispitivanom uređaju kao i referentni spektar izračunava se kao:

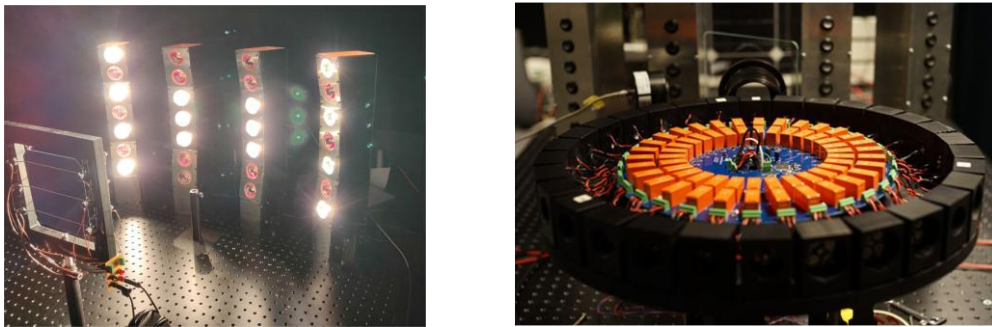
$$G_{eff} = SMM \cdot G_{meas} \quad (2.4)$$

gdje je G_{meas} ukupno ozračenje izmjereno referentnim uređajem prije primjene spektralne korekcije, a G_{eff} efektivno ozračenje nakon primjene spektralne korekcije. Standard propisuje dvije metode korekcije:

1. podešavanje ozračenja solarnog simulatora na vrijednost G_{meas} izvedenu iz formule 2.4 prije mjerenja, što je preferirana metoda jer se mjerenje provodi pri točnom referentnom ozračenju
2. mjerenje $U-I$ karakteristike pri mjenom ozračenju te translaciju krivulje na referentno ozračenje, što je uobičajeno pri mjerenjima pod prirodnim Sunčevim svjetlom gdje spektar nije moguće kontrolirati.

Standard IEC 60904-8 definira postupke za mjerenje spektralnog odziva FN uređaja, koji predstavlja jedan od ulaznih podataka za izračun SMM faktora i za razumijevanje spektralne osjetljivosti različitih FN tehnologija. Mjerenje se provodi osvjetljavanjem FN modula monokromatskom svjetlošću (obično korištenjem LED lampi ili monokromatora) poznate snage za svaku valnu duljinu u rasponu 300-1200 nm, pri čemu se mjeri struja kratkog spoja I_{sc} . Cijeli spektralni raspon pokriva se mjerenjima na 30-100 različitih valnih duljina, čime se

dobiva potpuni profil osjetljivosti FN uređaja prema različitim valnim duljinama svjetlosti. Moderna eksperimentalna postavka za mjerenje spektralnog odziva, prikazana na slici 2.11, koristi diferencijalni pristup s moduliranim monokromatskim izvorom svjetlosti i dodatnim osvjetljenjem koje osigurava standardne testne uvjete [93]. Koristi se 30 LED lampi koje pokrivaju spektralni raspon 290-1300 nm, kombinirane s halogenim lampama koje generiraju pristrano osvjetljenje do 1000 W/m². Standardi IEC 60904-7 i 60904-8 međusobno su povezani budući da točnost spektralne korekcije izravno ovisi o kvaliteti mjerenja spektralnog odziva.



Slika 2.11 Eksperimentalno mjerenje spektralnog odziva [93].

2.3.2. Standard IEC 61853: Energetsko ocjenjivanje FN modula

Ocjenjivanje FN modula prema njihovoj energiji, a ne prema njihovoj nazivnoj STC snazi, zagovara se već nekoliko desetljeća [24,94], a upravo je u tu svrhu razvijen standard IEC 61853. Također, ovim standardom je napravljen prvi korak prema tome da se pri ocjenjivanju rada FN modula više ne oslanja isključivo na standardni AM 1,5 spektar, budući da se većina njihovog rada odvija u uvjetima koji od njega odstupaju. IEC 61853 se sastoji od četiri dijela:

1. IEC 61853-1 definira zahtjeve za procjenu rada FN modula u smislu ocjenjivanja snage kroz raspon ozračenja i temperatura. Propisuje matričnu strukturu mjerenja s različitim kombinacijama temperature (15-75 °C) i ozračenja (100-1300 W/m²) prikazanu u tablici 2.3. Matrica uključuje 22 obvezne mjerne točke te šest kombinacija visokih temperatura i niskih ozračenja koje nije obavezno mjeriti (označeno kao NA u matrici standarda). Uključuje standardne testne uvjete (STC), uvjete niskog ozračenja (engl. *low-irradiance conditions* - LIC) i uvjete visoke temperature (engl. *high-temperature conditions* - HTC). U ovom standardu koristi se samo referentni AM 1,5 spektar [95]. Definirana je i nominalna radna temperatura ćelije (engl. *nominal operating cell temperature* - NOCT), ali preko temperature zraka od 20 °C, ozračenja od 800 W/m² i brzine vjetra od 1 m/s, a ne određene temperature modula, pa se stoga ne pojavljuje kao zasebna točka u matrici u tablici 2.3.

Tablica 2.3 IEC 61853-1 matrica uvjeta ispitivanja [96,97].

Ozračenje [W/m ²]	Temperatura modula			
	15 °C	25 °C	50 °C	75 °C
1100	N/A	1	2	3
1000	4	5 (STC)	6	7
800	8	9	10	11
600	12	13	14	15 (HTC)
400	16	17	18	N/A
200	19	20 (LIC)	N/A	N/A
100	21	22	N/A	N/A

- IEC 61853-2 definira postupke mjerenja za utvrđivanje učinaka kuta upada ozračenja na izlaznu snagu FN uređaja, određuje radnu temperaturu modula za zadane uvjete okoline i montaže i definira mjerenje spektralnog odziv modula po uzoru na standard 60904-8 [98].
- IEC 61853-3 opisuje izračun vrijednosti energetske ocjene FN modula. Definira metodologiju za određivanje energetskog izlaza FN modula [Wh] i bezdimenzijske klimatski specifične energetske ocjene (engl. *climate specific energy rating - CSER*) [99]. Algoritam za proračun CSER-a sastoji se od pet uzastopnih koraka, prikazanih na slici 2.12 koji se provode za svaki sat u godini (ukupno 8760 sati), koristeći ulazne podatke iz standarda IEC 61853-1 (matrica snage), IEC 61853-2 (spektralni odziv, kutni odziv i temperaturni koeficijenti) te IEC 61853-4 (klimatski profili). Nakon provedene korekcije ozračenja zbog kuta upada, spektralne korekcije i izračuna temperature modula, određuje se trenutna izlazna snaga modula $P_{mod,j}$ za svaki sat u godini j interpolacijom ili ekstrapolacijom iz matrice učinkovitosti modula:

$$P_{mod,j} = \eta(G_{eff,j}, T_{mod,j}) \cdot G_{corr,j} \cdot A_{mod} \quad (2.5)$$

gdje je $\eta(G_{eff,j}, T_{mod,j})$ učinkovitost modula određena bilinearnom interpolacijom ili ekstrapolacijom za specifične vrijednosti spektralno korigiranog ozračenja $G_{eff,j}$ i temperature modula $T_{mod,j}$, a A_{mod} površina modula. Ukupna godišnja energetska proizvodnja dobiva se sumiranjem svih satnih vrijednosti:

$$E_{mod,year} = \sum_{j=1}^{8760} P_{mod,j} \cdot \Delta t \quad (2.6)$$

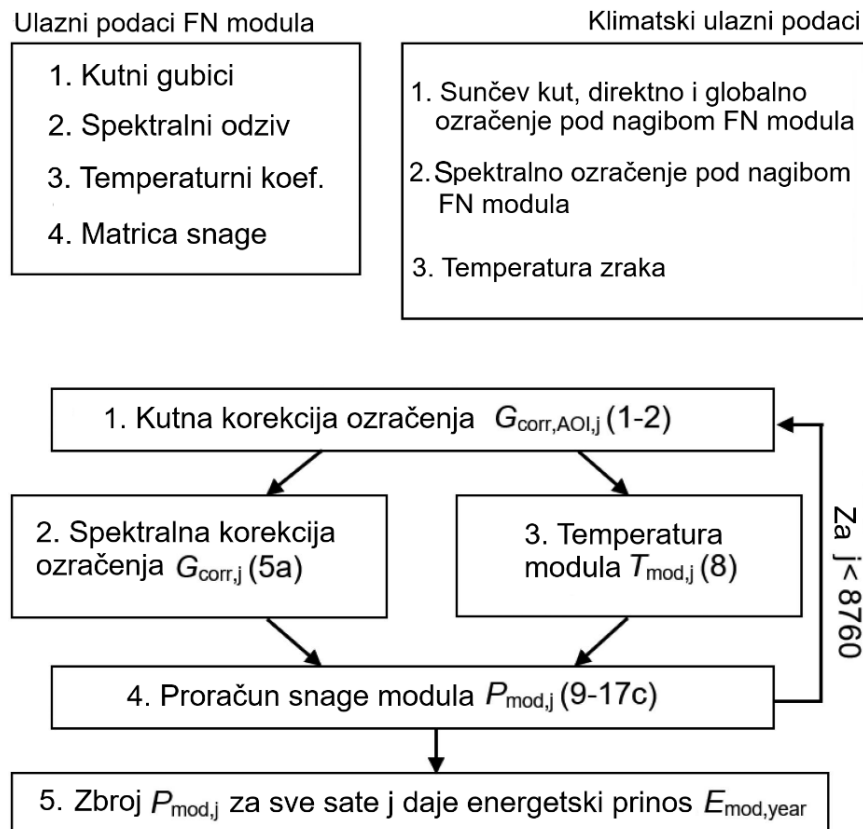
gdje je $\Delta t=1$ h. Klimatski specifična energetska ocjena (CSER) konačno se izračunava kao bezdimenzijski omjer između godišnje energetske učinkovitosti modula u određenom klimatskom profilu i njegove učinkovitosti pri STC uvjetima:

$$CSER = \frac{E_{mod,year}}{H_{p,year}} \cdot \frac{P_{max,STC}}{G_{ref,STC}} \quad (2.7)$$

gdje je

$$H_{p,year} = \sum_{j=1}^{8760} G_{corr,j} \cdot \Delta t \quad (2.8)$$

ukupna godišnja ozračenost u ravnini modula, a $P_{max,STC}$ i $G_{ref,STC}= 1000$ W/m² nazivna snaga modula i referentno ozračenje pri standardnim uvjetima ispitivanja.



Slika 2.12 Proračun energetske ocjene FN modula po standardu 61853-3 [99].

Standard IEC 61853-3 propisuje korištenje bilinearne interpolacije i ekstrapolacije za procjenu učinkovitosti FN modula pri proizvoljnim kombinacijama ozračenja i temperature na temelju mjerenja prema IEC 61853-1 matrici. Međutim, opsežna analiza provedena u SNL-u pokazala je da ovaj pristup ima inherentne sustavne pogreške [97]. Naime, površina učinkovitosti FN modula kao funkcija ozračenja i temperature pokazuje konkavnu zakrivljenost prema dolje, što rezultira sustavnim podcjenjivanjem učinkovitosti tijekom interpolacije i precjenjivanjem tijekom ekstrapolacije. Dodatno, bilinearna interpolacija je osjetljiva na mjerene nedostatke i odstupajuće vrijednosti, osobito kada se one pojavljuju na rubu matrice mjerenja, gdje njihov učinak nastavlja rasti s ekstrapolacijom. Zbog ovih ograničenja, razvijeni su alternativni pristupi modeliranju koji mogu bolje reproducirati fizikalno ponašanje FN modula, osobito pri ekstrapolaciji izvan raspona mjerenja. Među tim modelima ističe se model koji je razvijen specifično za primjenu s IEC 61853 podacima i pokazuje superiornu točnost pri ekstrapolaciji [97].

- IEC 61853-4 opisuje standardne referentne klimatske profile koji se koriste za izračun energetske ocjene. Svih 6 klimatskih profila prikazano je u tablici 2.4. Standard sadrži prilog u obliku datoteka s podacima za svaki standardni klimatski profil. Podaci obuhvaćaju satne vrijednosti meteoroloških podataka za cijelu godinu, uključujući i specifičnu spektralnu raspodjelu Sunčeva zračenja [100].

Tablica 2.4 Referentni klimatski profili iz standarda IEC 61853-4 [100].

Redni broj	Geografska širina	Vrsta klime	Ukupna godišnja ozračenost na nagnutu plohu [kWh/m ²]
1	1 °S	Tropska vlažna	1677,7
2	33° 30' N	Subtropska suha	2295,5
3	33° 22' N	Subtropska obalna	1496,6
4	56 °N	Umjerena obalna	972,9
5	34 °N	Planinska (iznad 3000 m)	2139,1
6	57 °N	Umjerena kontinentalna	1266,0

Veliko interdisciplinarno istraživanje standarda IEC 61853 u kojem je sudjelovalo 10 istraživačkih institucija pokazalo je da zajednička validacija algoritama za energetske ocjenjivanje FN modula može smanjiti razlike u izračunima klimatski specifične energetske ocjene FN modula s 14,7% na manje od 0,1% [37]. Time su među ostalim uspostavljene najbolje prakse za spektralnu korekciju, što ima za cilj osigurati dosljednost u različitim okvirima za modeliranje, budući da pojedini koraci u proceduri za izračun CSER-a ostavljaju prostor za različite interpretacije.

2.4. Kvantifikacija spektralnog utjecaja na rad FN modula

U području matematičke kvantifikacije utjecaja spektra na rad FN modula još uvijek ne postoji dogovor oko optimalnog pristupa. U istraživačkim radovima primjenjuju se heterogene metodologije u pogledu filtriranja podataka, metoda ekstrapolacije, izbora mjernih uređaja i upotrijebljenih naziva i oznaka. Prvi sustavni pregled postojećih metoda proračuna spektralnog utjecaja dan je u radu [101]. Uvedena je usklađena nomenklatura za različite spektralne faktore, koja je korištena u ovoj disertaciji. Što se tiče matematičke kvantifikacije, spektralni faktori mogu se podijeliti na dvije glavne kategorije:

1. Nezavisni spektralni faktori - faktore koji nisu vezani uz specifičnu FN tehnologiju i pružaju opće informacije o obliku i karakteristikama Sunčeva spektra
2. Zavisni spektralni faktori - koji ovise o spektralnom odzivu pojedine FN tehnologije.

Među nezavisnim spektralnim faktorima, najistraživaniji i najčešće korišten parametar je prosječna energija fotona (*APE*). Iako postoje i drugi nezavisni faktori, poput udjela plavog svjetla, koji se definira kao udio valnih duljina kraćih od 650 nm u ukupnom spektru, u literaturi je dokazana superiornost prosječne energije fotona kao najkvalitetnijeg nezavisnog spektralnog faktora [102–107]. Iz tog razloga, ostali nezavisni faktori u ovom radu nisu detaljno analizirani. Vrijednost *APE* se proračunava izravno iz spektra i pomoću jednog broja daje opis konačne spektralne raspodjele nakon što je na nju djelovao cjelokupni skup okolišnih parametara. Po definiciji, ovaj faktor trebao bi sadržavati informacije o svim varijablama koje utječu na spektar jer predstavlja numeričku reprezentaciju izmjerene spektralne raspodjele nakon što su fotoni u toj raspodjeli već bili pod utjecajem svih okolišnih fenomena. Izračunava se dijeljenjem integriranog spektralnog ozračenja s integriranom gustoćom toka fotona preko promatranog raspona valnih duljina [108]:

$$APE = \frac{\int_a^b E(\lambda) d\lambda}{\int_a^b \Phi(\lambda) d\lambda} \quad (2.9)$$

gdje je $E(\lambda)$ spektralno ozračenje, $\Phi(\lambda)$ je gustoća toka fotona, a a i b su donja i gornja granica valnih duljina razmatranog valnog područja. Pruža kvantitativnu mjeru o relativnom pomaku promatranog Sunčeva spektra prema kraćim ili dužim valnim duljinama u odnosu na referentni AM 1,5 spektar. Njegove veće vrijednosti ($>1,88$ eV) ukazuju na spektar bogat plavom bojom, dok niže vrijednosti ($<1,88$ eV) ukazuju na spektar bogat crvenom bojom. Premda je u literaturi dokazano da APE može učinkovito karakterizirati spektralnu raspodjelu i da se može smatrati korisnim indeksom za procjenu rada FN sustava, izazov predstavlja nejedinstven odnos između APE vrijednosti i stvarnog oblika spektra, odnosno potencijalni nedostatak bijekcije. To znači da je moguće da različiti spektri rezultiraju istom APE vrijednošću [8,68–71,109–111]. Analiza provedena na dvogodišnjim podacima iz Španjolske sugerira da je APE prikladan za karakterizaciju vidljivog i dijela NIR spektra (450-900 nm), dok izvan tog raspona varijabilnost raste [112]. Ova problematika detaljnije je analizirana u trećem poglavlju ove disertacije na temelju sintetiziranih spektara s više lokacija.

S druge strane, faktori ovisni o FN uređaju daju preciznije informacije o utjecaju spektra na rad promatranog FN modula, ali zahtijevaju laboratorijska mjerenja njegova spektralnog odziva. U ovom radu korišten je faktor spektralne korekcije (engl. *spectral factor* - SF), jer se radi o veličini koja je postala standardom u većini spektralnih analiza [27,28,31,32]. Ovaj faktor proizlazi iz faktora spektralne neusklađenosti ukoliko se kao referentni FN uređaj uzme uređaj sa spektralnim odzivom konstantnim na svim valnim duljinama, što se u praksi može napraviti korištenjem piranometra. U tom slučaju se jednadžba 2.3 svodi na:

$$SF = \frac{\int E(\lambda)SR(\lambda)d\lambda}{\int E_{ref}(\lambda)SR(\lambda)d\lambda} \cdot \frac{\int E_{ref}(\lambda)d\lambda}{\int E(\lambda)d\lambda} \quad (2.10)$$

gdje integral umnoška spektralnog ozračenja i spektralnog odziva fizikalno predstavlja gustoću struje J proporcionalnu struji kratkog spoja I_{sc} :

$$I_{sc} \propto \int E(\lambda)SR(\lambda)d\lambda \quad (2.11)$$

Integral spektralnog ozračenja predstavlja ukupno ozračenje G . Stoga se 2.10 svodi na omjer struje kratkog spoja (I_{sc}) koju bi FN modul proizveo pod stvarnim spektrom i one pod referentnim spektrom AM 1.5 ($I_{sc,ref}$) normaliziran za ukupno ozračenje:

$$SF = \frac{I_{sc}}{I_{sc,ref}} \cdot \frac{G_{ref}}{G} \quad (2.12)$$

Vrijednosti faktora spektralne korekcije (SF) interpretiraju se na sljedeći način: $SF < 1$ označava smanjenje energetskog prinosa u odnosu na referentni spektar, dok $SF > 1$ ukazuje na povećanje prinosa. Time se postiže izravna i praktična kvantifikacija spektralnog utjecaja na energetski učinak fotonaponske pretvorbe. Detaljniji izvod ove formule opisan je u radu [32].

Iako je neposredno mjerenje spektra Sunčeva zračenja neophodno za točnu karakterizaciju njegova utjecaja na rad FN modula, nedostatak opsežnih spektralnih mjerenja potaknuo je razvoj alternativnog pristupa. Naime, razvijaju se modeli koji spektralni utjecaj procjenjuju korištenjem dostupnih atmosferskih varijabli koje se koriste kao zamjenski parametri. Različite atmosferske veličine, od taložne vodene pare i aerosola do mase zraka, utječu na spektralnu raspodjelu na različitim dijelovima spektra. Njihov kumulativni efekt određuje konačan oblik spektra koji utječe na FN modul u stvarnim uvjetima rada. Cilj razvoja modela temeljenih na atmosferskim varijablama je omogućiti neizravnu procjenu faktora spektralne korekcije bez mjerenja spektra Sunčeva zračenja. Na taj način moguće je procijeniti spektralni utjecaj na nekoj lokaciji koristeći samo uobičajeno dostupne meteorološke podatke, bez potrebe za skupom spektrometrijskom opremom. Ovaj pristup čini spektralne korekcije primjenjivima na široj geografskoj skali, što je posebno važno za simulacije i procjene energetskog potencijala FN sustava na lokacijama gdje spektralna mjerenja nisu dostupna.

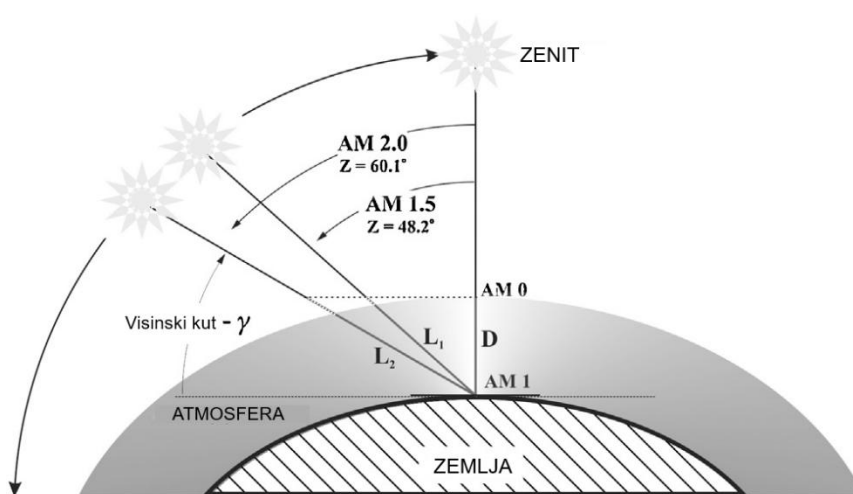
Prednost primjene zamjenskih atmosferskih varijabli leži u njihovoj dostupnosti: neke od njih sastavni su dio standardnih meteoroloških mjerenja dostupnih na većini meteoroloških postaja. Primjerice, tlak, temperatura i relativna vlažnost zraka rutinski se mjere na gotovo svim mjestima s meteorološkom opremom, a masa zraka izračunava se izravno iz zenitnog kuta. U nastavku su opisane najvažnije atmosferske varijable i modeli spektralne korekcije temeljeni na njima.

2.4.1. Masa zraka

Jedna od najčešće korištenih zamjenskih varijabli za karakterizaciju spektra Sunčeva zračenja je masa zraka (AM). Predstavlja mjeru optičkog puta koji Sunčevo zračenje prolazi kroz atmosferu, izraženu kao omjer duljine tog puta i vertikalnog puta do zenita što je prikazano na slici 2.16. Ipak, takva aproksimacija vrijednosti AM je ispravna samo za zenitne kutove manje od 70° . Precizniji izraz za određivanje mase zraka koji osim zenitnog kuta uzima u obzir i zakrivljenost Zemlje je tzv. Kasten-Youngova formula [50]:

$$AM = (\cos \theta_z + 0.50572(96.07995 - \theta_z)^{-1.6364})^{-1} \quad (2.13)$$

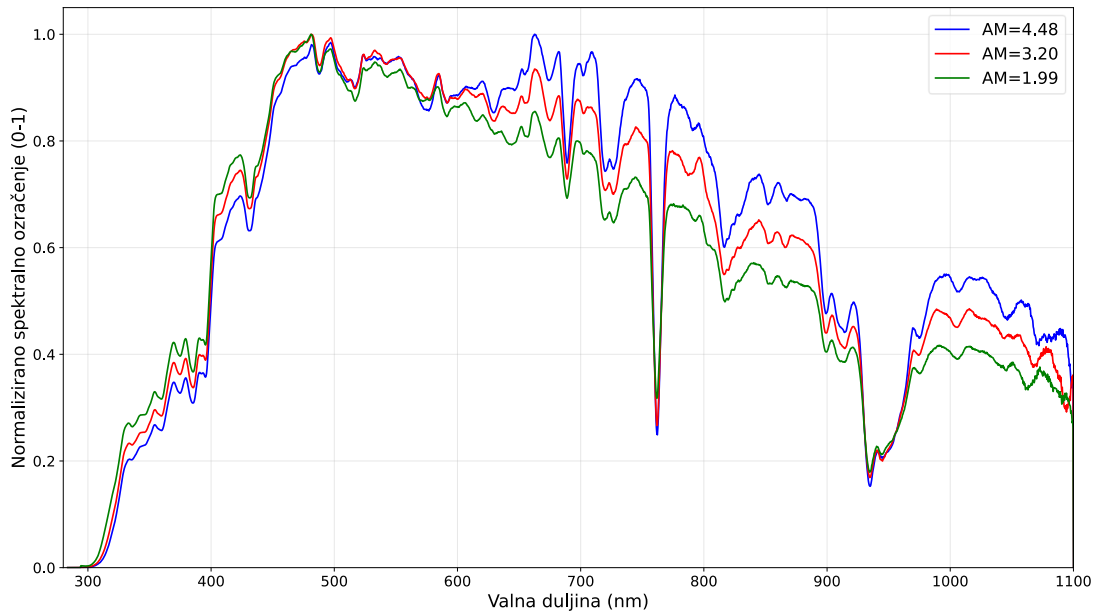
gdje je θ_z zenitni kut. Osim navedenog, postoji još nekoliko izraza za izračunavanje vrijednosti AM , no razlike između njih su iznimno male - do zenitnog kuta od 85° praktički nema razlike, dok su za kutove od 85° do 90° razlike manje od 0,5% [41]. U skladu s prihvaćenom definicijom, $AM 1$ se odnosi se na Sunčevo zračenje na ekvatoru, sa Suncem u zenitu. U slučaju $AM 1,5$, zenitni kut iznosi $48,2^\circ$, a za $AM 2$ iznosi 60° što je također prikazano na slici 2.13 skupa s ekstraterestričkim spektrom $AM 0$ na rubu Zemljine atmosfere.



Slika 2.13 Zenitni kutovi i pripadajuće mase zraka [41].

Povećanjem AM atmosfera više utječe na spektralnu raspodjelu Sunčeva zračenja, što općenito smanjuje njegov intenzitet, posebice u vidljivom dijelu spektra u kojem je najveći spektralni odziv materijala koji se koriste za izradu FN ćelija. Veće vrijednosti AM izraženije prigušuju kraće valne duljine, mijenjajući tako spektralnu raspodjelu zračenja koje upada na površinu FN modula što se može vidjeti na slici 2.14. Na toj slici je prikazan normalizirani spektar izmjeren u istom danu u tri različita trenutka, tj. za tri različite vrijednosti AM . Spektar je izmjeren 4. veljače 2025. u Splitu na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje. Za svaki izmjereni spektar normalizacija je provedena dijeljenjem vrijednosti spektralnog ozračenja pri svakoj valnoj duljini s maksimalnom vrijednošću spektralnog ozračenja tog mjerenja, tako da se dobija jedinična vršna vrijednost $E(\lambda)$ za svaki spektar. Time je omogućena vizualna usporedba grafova budući da su normalizacijom uklonjene razlike zbog ukupne vrijednosti ozračenja.

Model koji opisuje spektralni utjecaj kao funkciju apsolutne mase zraka (mase zraka korigirane za atmosferski tlak - AM_a) opisan je u radu [43]. Korekcija tlaka potrebna je za uzimanje u obzir



Slika 2.14 Tri normalizirana spektra s različitim vrijednostima AM izmjerena u Splitu, 4. veljače 2025.

smanjenja gustoće zraka na različitim nadmorskim visinama, a također i za varijacije tlaka na istoj lokaciji koje utječu na gustoću zraka. Odnos AM i AM_a opisan je relacijom:

$$AM_a = AM \cdot \frac{P}{P_0} \approx AM \cdot e^{-0.0001184 \cdot h} \quad (2.14)$$

gdje je P tlak na lokaciji, P_0 referentni tlak na površini mora, a h nadmorska visina. Model temeljen na AM_a predstavljen je empirijski određenim polinomom koji povezuje utjecaj Sunčeva spektra na SF s varijacijom mase zraka tijekom dana:

$$SF = \beta_0 + \beta_1 \cdot AM_a + \beta_2 \cdot (AM_a)^2 + \beta_3 \cdot (AM_a)^3 + \beta_4 \cdot (AM_a)^4 \quad (2.15)$$

gdje su β_0 - β_4 empirijski dobiveni koeficijenti. Ovaj model spektralne korekcije koristi se i u poznatom Sandia modelu fotonaponskog polja (engl. *Sandia PV Array Performance Model - SAPM*) [113]. Javno dostupna baza podataka svih SAPM koeficijenata za razne FN tehnologije može se pronaći u PVLIB Python biblioteci, a postoji i vodič za empirijsko određivanje koeficijenata [114,115]. Ovaj model se pokazao relativno konzistentnim na različitim lokacijama, što ga čini vrijednim alatom za karakterizaciju spektralnog utjecaja, ali samo za uvjete vedrog neba, dok mu se točnost znatno smanjuje za sve uvjete neba. Glavni mu je nedostatak što predstavlja idealiziranu aproksimaciju koja ne uzima u obzir utjecaj taložne vodene pare, aerosola, oblaka i drugih varijabli na spektralnu distribuciju. Naime, u uvjetima vedrog dana bez oblaka s malom količinom aerosola, AM može biti dominantan faktor koji utječe na spektralnu distribuciju, ali često to nije slučaj. Zbog toga se AM najčešće koristi u

kombinaciji s drugim varijablama za razvoj funkcija spektralne korekcije koje bolje opisuju stvarne uvjete.

2.4.2. Taložna vodena para

Taložna vodena para (W) predstavlja dubinu tekuće vode u uspravnom stupcu atmosfere koja bi nastala kada bi se sva para kondenzirala i mjeri se u centimetrima. Taložna vodena para je značajan faktor u prognoziranju vremena i klimatskom modeliranju. U slučaju nepostojanja mjerenih podataka W se može procijeniti korištenjem sljedeće jednadžbe [116]:

$$W = 0,1H_v\rho_v \quad (2.16)$$

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

$$H_v = 0,4976 + 1,5265\beta + \exp(13,6897\beta - 14,9188\beta^3) \quad (2.17)$$

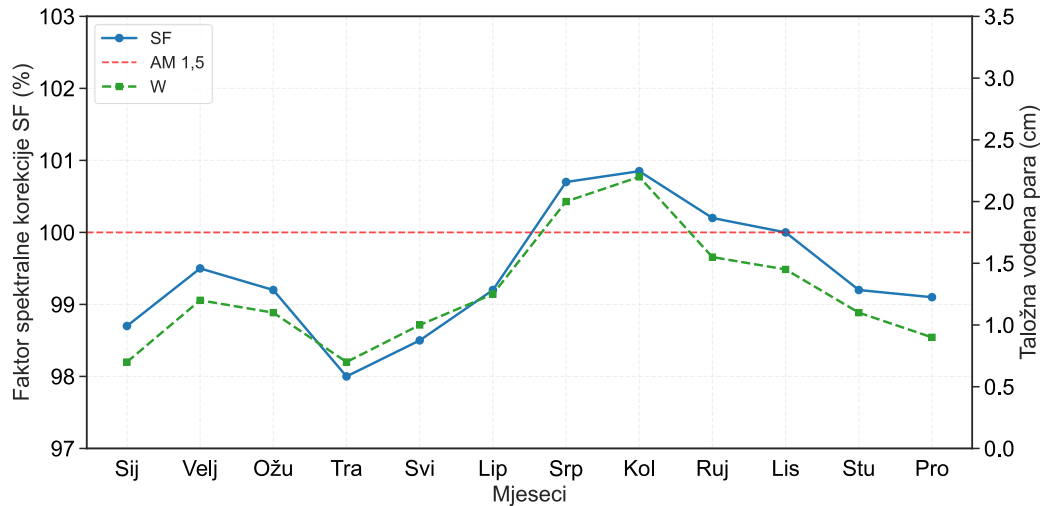
gdje je $\beta = T/T_0$ i $T_0 = 273,15$ K. Istovremeno, ρ_v je funkcija relativne vlažnosti (RH), temperature T [K], i zasićenog tlaka vodene pare, e_s [mbar], koji je također funkcija temperature zraka [117]:

$$\rho_v = 216,7 \cdot \frac{RHe_s}{T} \quad (2.18)$$

$$e_s = \exp a_0 + a_1T_0^{-1} + a_2T_0^{-1} + a_3T_0^{-1} \quad (2.19)$$

Kao alternativa modelima koji se temelje na masi zraka, predložen je model za procjenu faktora spektralne korekcije koja se temelji na taložnoj vodenoj pari W [44]. Istraživanje je provedeno isključivo za CdTe FN module, a temeljni motiv za to bila je njihova specifična osjetljivost na promjene u količini taložne vodene pare u atmosferi. Provedena je analiza osjetljivosti korištenjem SMARTS2 programskog alata u svakoj simulaciji pri čemu je mijenjan jedan ulazni parametar. Modeliranje je također napravljeno korištenjem istog programskog alata, pri čemu su korišteni podaci za 11 različitih lokacija u SAD-u. Pokazalo se da taložna vodena para za pojedine lokacije uzrokuje varijacije faktora spektralne korekcije od $\pm 6\%$. Utvrđena je jaka korelacija između tih dviju veličina (vidljivo na slici 2.15 koja prikazuje mjesečne vrijednosti W i $SF-a$) temeljem čega je razvijena empirijska relacija:

$$SF = 0,632 + 0,134 \cdot \exp(0,976(W + 0,05)^{0,079}) \quad (2.20)$$

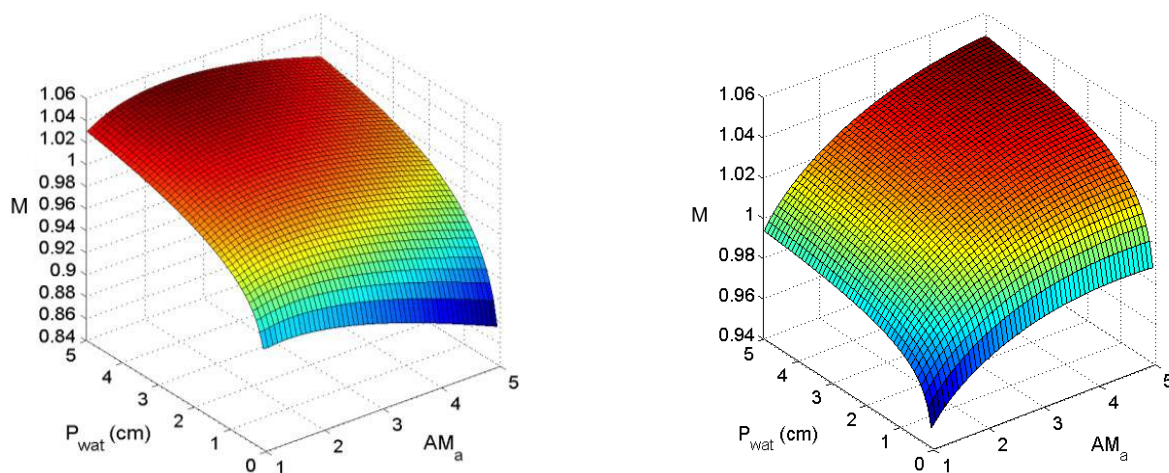


Slika 2.15 Odnos između mjesečnih vrijednosti SF i W za CdTe modul.

Opisani W model ima nekoliko značajnih ograničenja: fokusira se samo na taložnu vodenu paru i vrijedi isključivo za vedro vrijeme, a dodatno zanemaruje spektralne utjecaje pri niskim razinama ozračenja ($<500 \text{ W/m}^2$). Ovaj model stoga nije našao široku primjenu u znanstvenoj zajednici. Međutim, Nelsonov model poslužio je kao temelj za daljnja poboljšanja u razvoju modela spektralne korekcije. Nelsonov pristup nadograđen je na dvoparametarski model koji integrira AM i W [47]. Na slici 2.16 prikazana je ovisnost SF -a o W i AM za CdTe i poli-Si module. Time je omogućena primjena modela na širi spektar FN tehnologija, što je bilo temeljno ograničenje prethodnog pristupa. Model koristi koeficijente koji su posebno određeni za određenu FN tehnologiju temeljem krivulje spektralnog odziva FN modula:

$$SF = \beta_0 + \beta_1 \cdot AM_a + \beta_2 \cdot W + \beta_3 \cdot \sqrt{AM_a} + \beta_4 \cdot \sqrt{W} + \beta_5 \cdot \frac{AM_a}{\sqrt{W}} \quad (2.21)$$

gdje je SF faktor spektralne korekcije, AM_a je apsolutna masa zraka, W je taložna vodena para, a β_0 - β_5 su koeficijenti specifični za pojedinu FN tehnologiju. Validacija kroz opsežne terenske podatke s tri različite klimatske lokacije potvrdila je da je predloženi dvoparametarski model u većini slučajeva superiorniji u odnosu na jednoparametarske korekcije, posebno za poli-Si module gdje je došlo do značajnog poboljšanja u točnosti procjene SF -a. Međutim, za CdTe module na pojedinim lokacijama poput Golden, Colorado, SAD, model nije pokazao poboljšanje u odnosu na Nelsonov model, što ukazuje na tehnologijsku i lokacijsku ovisnost njegove učinkovitosti. Unatoč ovim varijabilnostima, statistički pokazatelji potvrđuju da model općenito poboljšava točnost predviđanja i predstavlja koristan alat za praktičnu primjenu u energetskim prognozama, što je potkrijepljeno njegovom implementacijom u PVLIB programsku biblioteku dostupnu širokoj zajednici.



Slika 2.16 Ovisnost SF-a o W i AM za CdTe (lijevo) i poli-Si (desno).

Sljedeći napredak u modeliranju spektralnih utjecaja slijedio je uvođenjem trećeg parametra, tzv. indeksa čistoće neba (engl. *clear-sky index - CSI*). Indeks čistoće neba je omjer ukupnog ozračenja na vodoravnu plohu i ukupnog ozračenja na vodoravnu plohu koji bi bio u tom trenutku na toj lokaciji kada bi vladali uvjeti vedrog neba. Taj model, poznat kao Spectral 3.0, uveo je dodatna poboljšanja i omogućio povezivanje spektralnog utjecaja s naoblakom i opisan je relacijom [48]:

$$SF = \beta_0 CSI + \beta_1 W + \beta_2 AM_a + \beta_3 \quad (2.22)$$

Validacija troparametarskog modela provedena je na 104 lokacije korištenjem spektra dobivenog pomoću FARMS-NIT programskog alata. Pokazana su statistički značajna poboljšanja u odnosu na Spectral 2.0. Međutim, važno je napomenuti da su ovi rezultati ostvareni isključivo na sintetiziranim spektralnim podacima, bez validacije na stvarnim mjerenjima, što predstavlja značajno ograničenje. Unatoč ovim ograničenjima, Spectral 3.0 čini važan korak prema kvalitetnijem spektralnom modeliranju, iako njegova praktična primjenjivost za energetske prognoze zahtijeva daljnju validaciju na terenskim podacima.

2.4.3. Indeks vedrine neba

Indeks prozirnosti ili indeks vedrine neba K_t prvotno je definiran se kao omjer ukupnog ozračenja izmjenog na površini Zemlje (engl. *global horizontal irradiance - G_h*) i ekstraterestričkog ozračenja (engl. *global extraterrestrial irradiance - G_e*) na vrhu atmosfere. Ovako definiran K_t ovisan je o solarnom zenitnom kutu jer vrijedi [118]:

$$G_e = G_{sc} \cdot \left[1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \cdot \cos \theta_z \right] \quad (2.23)$$

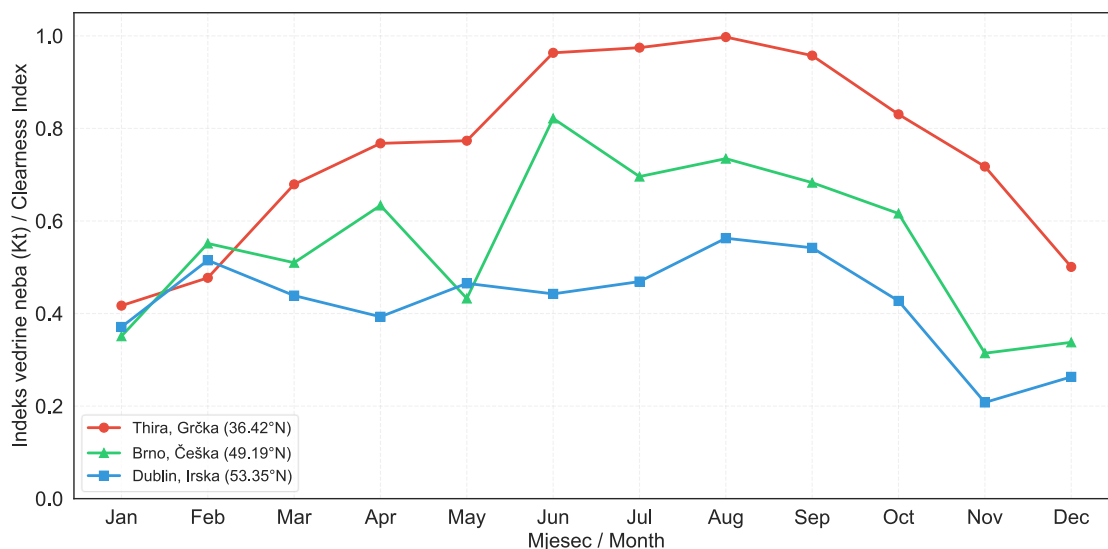
gdje je $G_{sc}=1367 \text{ W/m}^2$ solarna konstanta (ukupno Sunčevo ozračenje na ulasku u atmosferu [119]), n redni broj dana u godini (1-365), a θ_z zenitni kut. Zbog toga se vrijednosti K_t mijenjaju tijekom dana čak i u uvjetima vedrog neba, što otežava razlikovanje učinka naoblake od učinka relativnog položaja Sunca na nebu. Stoga se u suvremenim modelima za procjenu spektralnih efekata koristi modifikacija indeksa vedrine neba K_t definirana kao omjer izmjerene G i teoretskog maksimalnog ozračenja koje nastupa u uvjetima vedrog neba G_{cs} [54]:

$$K_t = \frac{G}{G_{cs}} \quad (2.24)$$

Ovaj parametar se izračunava pomoću fizikalnih modela vedrog neba koji uzimaju u obzir geografsku lokaciju, datum, vrijeme i atmosferske parametre. Ovaj pristup omogućava bolje razdvajanje učinka oblaka od drugih atmosferskih efekata. Jedinična vrijednost K_t označava idealno vedro nebo, dok niže vrijednosti ukazuju na prisutnost oblaka ili povećanje atmosferske zamućenosti. Vrijednosti K_t iznad jedinične su također dosta česte jer je moguće da se javi efekt pojačanja zbog refleksije s oblaka. Podjela uvjeta neba na osnovu vrijednosti K_t indeksa navedena je u tablici 2.5. Procjena ukupnog ozračenja na vodoravnu plohu pod vedrim nebom temeljni je korak u proračunu indeksa vedrog neba K_t . Najčešće korišteni modeli za proračun G_{cs} razlikuju se po kompleksnosti, potrebnim ulaznim parametrima i točnosti te su detaljnije razmotreni u trećem i četvrtom poglavlju ove disertacije. Za ilustraciju sezonskih varijacija indeksa vedrog neba u različitim klimatskim uvjetima prikazanih na slici 2.17, odabrane su tri karakteristične lokacije: Thira (Grčka) kao primjer suhe klime s visokim K_t , Brno (Češka) kao primjer kontinentalne umjerene klime, te Dublin (Irska) kao primjer priobalne klime s niskim vrijednostima K_t . Mjesečni prosjeci K_t izračunati su iz satelitskih podataka o ozračenju iz NSRDB baze podataka [120].

Tablica 2.5 Interpretacija vrijednosti K_t indeksa.

Vrijednost K_t	Interpretacija	Karakteristike
0,0-0,3	Jako oblačno	Gusti oblaci, slabo ozračenje
0,3-0,6	Umjereno oblačno	Djelomična prozirnost, varijabilni uvjeti
0,6-0,85	Blago oblačno	Rijetki oblaci, dobra prozirnost
0,85-1,0	Vedro ili gotovo vedro	Visoka prozirnost
>1,0	Pojačano zračenje	Efekt pojačanja zbog refleksije s oblaka



Slika 2.17 Sezonske varijacije K_t indeksa za tri lokacije s različitim klimama.

U literaturi postoje dva modela koja eksplicitno uključuju K_t kao varijablu za procjenu spektralnog utjecaja. Empirijski model nazvan za procjenu utjecaja varijacija u spektru Sunčeva zračenja na rad FN modula nazvan „JRC model“ temelji se na pretpostavci da promjene u spektru prvenstveno utječu na struju kratkog spoja FN modula, a time i na izlaznu snagu [54]. Koeficijenti modela određeni su za dvije vrste FN modula: mono-Si i CdTe. Model uzima u obzir varijable AM i K_t , a rezultati mjerenja u Italiji pokazuju da spektralne varijacije u prosjeku povećavaju energetske učinak za 0,4% za c-Si i 1,5% za CdTe u odnosu na očekivane vrijednosti pri standardnim uvjetima. Model ima oblik:

$$I_{sc} = I_{sc,ref} + \beta_1(e^{-K_t} - e^{-1}) + \beta_2(K_t - 1) + \beta_3(AM_a - 1,5) \quad (2.25)$$

gdje koeficijenti k_1 - k_3 moraju biti određeni prilagođavanjem izmjerenim podacima. Vrijednost $I_{sc,ref}$ predstavlja struju kratkog spoja pri standardnim testnim uvjetima.

Drugi empirijski model je tzv. PVSPEC model, koji se također temelji na korištenju formulacije temeljene na AM_a i K_t , ali za razliku od JRC modela proračunava SF [53]. Istraživanje je uključivalo opsežan skup podataka s osam lokacija, ali treba naglasiti da je za mjerenje na šest lokacija korišten Spectrafy-SIM-G filterarski radiometar umjesto spektroradiometra. Implementiran je rigorozan protokol kontrole kvalitete s dvanaest filtera kako bi se osigurala pouzdanost spektralnih mjerenja. Model je kalibriran za šest FN tehnologija (poli-Si, mono-Si, a-Si, CIGS, CdTe) i proračunava vrijednost SF -a prema sljedećem izrazu:

$$SF = \beta_1 K_t^{\beta_2} AM_a^{\beta_3} \quad (2.26)$$

2.4.4. Optička dubina aerosola

Optička dubina aerosola (engl. *aerosol optical depth - AOD*) predstavlja bezdimenzijsku mjeru koliko aerosol (suspenzija čestica krutih tvari ili kapljica tekućine promjera manjeg od 1 μm u atmosferi [121]) slabi Sunčevo zračenje uslijed apsorpcije i raspršenja na određenoj valnoj duljini [122]. Ekstremni događaji koji uzrokuju povišene razine *AOD*-a, poput šumskih požara i smoga, mogu smanjiti proizvodnju FN sustava i do 40% [123,124]. Generalno, *AOD* najviše utječe na UV i vidljivi dio spektra, sa zanemarivim utjecajem iznad valne duljine od 1000 nm [125]. Optička dubina aerosola izravno ovisi o koncentraciji, veličini, obliku i optičkim svojstvima čestica u atmosferskom stupcu. *AOD* se tipično izražava na referentnoj valnoj duljini od 500 nm i izračunava se primjenom Beer-Lambertova zakona, koji opisuje eksponencijalno slabljenje zračenja pri prolasku kroz optički aktivni medij [126]. Vrijednost mu se može odrediti iz mjerenja sunčevih fotometara [77] ili iz satelitskih podataka [62]. Budući da aerosoli selektivno utječu na spektralnu raspodjelu, *AOD* je važan parametar za preciznije modeliranje spektralnih varijacija, posebno u urbanim, industrijskim i suhim područjima s povećanom koncentracijom čestica. Upravo zbog toga, napredniji modeli spektralne korekcije za uvjete vedrog neba uključuju *AOD* kao treću varijablu uz *AM* i *W*, nastojeći na taj način obuhvatiti kompleksniju interakciju atmosferskih čimbenika koji oblikuju spektar. Takav se način modeliranja pokazao posebno pogodan za koncentrirane fotonaponske sustave (CPV), pri čemu se izračun faktora spektralne korekcije provodi rješavanjem skupa analitičkih jednadžbi [59]. Nadalje, isti je metodološki okvir kasnije proširen na šest različitih tehnologija klasičnih FN modula, pri čemu su za svaki materijal razvijene specifične analitičke jednadžbe [60]. *AM-W-AOD* modeli su pokazali visoku preciznost i dobro slaganje s eksperimentalnim podacima korištenim za validaciju. Unatoč tome, važno je istaknuti njihova ograničenja. Modeli su razvijeni i validirani na samo tri mjeseca podataka sa samo jedne lokacije (Jaén, Španjolska), što dovodi u pitanje njihovu primjenjivost na različite klimatske regije. Nadalje, važno je napomenuti da su ovi modeli primjenjivi isključivo za dane vedrog neba, što značajno umanjuje njihovu upotrebljivost u stvarnim, promjenjivim vremenskim uvjetima koji uključuju naoblaku. U tablici 2.6 prikazane su jednadžbe spektralne korekcije za sve analizirane FN tehnologije gdje su β_0 - β_9 koeficijenti određeni za svaku pojedinu tehnologiju.

Tablica 2.6 Predloženi skup jednadžbi za proračun SF vrijednosti za $AM-W-AOD$ model [60].

Materijal	$f(AM)$	$f(AOD)$	$f(W)$
a-Si	$\beta_4 x^4 + \beta_3 x^3 + \beta_2 x^2 + \beta_1 x + \beta_0$	$\beta_7 x^2 + \beta_6 x + \beta_5$	$\beta_9 \ln x + \beta_8$
Perovskit	$\beta_4 x^4 + \beta_3 x^3 + \beta_2 x^2 + \beta_1 x + \beta_0$	$\beta_7 x^2 + \beta_6 x + \beta_5$	$\beta_9 \ln x + \beta_8$
CdTe	$\beta_4 x^4 + \beta_3 x^3 + \beta_2 x^2 + \beta_1 x + \beta_0$	$\beta_6 \ln x + \beta_5$	$\beta_9 \ln x + \beta_8$
poli-Si	$\beta_4 x^4 + \beta_3 x^3 + \beta_2 x^2 + \beta_1 x + \beta_0$	$\beta_6 x + \beta_5$	$\beta_9 \ln x + \beta_8$
mono-Si	$\beta_4 x^4 + \beta_3 x^3 + \beta_2 x^2 + \beta_1 x + \beta_0$	$\beta_6 x + \beta_5$	$\beta_9 \ln x + \beta_8$
CIGS	$\beta_4 x^4 + \beta_3 x^3 + \beta_2 x^2 + \beta_1 x + \beta_0$	$\beta_6 x + \beta_5$	$\beta_9 \ln x + \beta_8$

2.4.5. Modeliranje spektralnog utjecaja korištenjem izravnih mjerenja spektra

Drugi pristup modeliranju spektralnog utjecaja na rad FN modula uzima u obzir parametre dobivene izravno iz izmjenjenog spektra Sunčeva zračenja. Iako ovi modeli imaju najveću točnost, oni zahtijevaju precizna kontinuirana mjerenja spektra Sunčeva zračenja na promatranoj lokaciji. Takva mjerenja su ograničena na manji broj specijaliziranih laboratorija. Kako je fokus ovog istraživanja na modelima koji su primjenjivi na lokacijama gdje takva mjerenja nisu dostupna, modeli temeljeni na izravnim spektralnim mjerenjima nisu predmet detaljne analize u ovom doktorskom radu. Međutim, prosječna energija fotona je korištena u prostorno-vremenskoj analizi za karakterizaciju sintetiziranog spektra i opis spektralnih učinaka na rad različitih FN tehnologija u trećem poglavlju.

Model predstavljen u [64] objašnjava gotovo 90% varijabilnosti $SF-a$ za a-Si, što je značajno bolje od metoda temeljenih na zamjenskim varijablama. Dodatna prednost APE metode je njezina univerzalnost - funkcijska veza između $APE-a$ i spektralne učinkovitosti je primjenjiva na sve vremenske uvjete, bez potrebe za razlikovanjem modela za različite atmosferske scenarije. Ipak, za mono-Si su rezultati lošiji te je daljnje istraživanje bilo usmjereno ka poboljšanju točnosti dodavanjem dodatne varijable. Pokazano je da se preciznost ovog modela može dodatno poboljšati kombinacijom $APE-a$ s drugim izravnim spektralnim parametrom, dubinom apsorpcijskog pojasa vode (ε) [66]. Parametar ε mjeri kako voda u atmosferi apsorbira specifične dijelove spektra, što APE kao globalni parametar ne može u potpunosti obuhvatiti. Ova proširena metoda validirana je na tri različite FN tehnologije, mono-Si, CdTe i a-Si, i donosi dodatnih 10% poboljšanja za mono-Si i a-Si te 2% za CdTe. Podaci korišteni u istraživanju ograničeni su na jednu lokaciju, pa mogu biti specifični za lokalnu klimu,

karakteristike korištenih FN modula ili specifičnu konfiguraciju mjerne stanice. Prema tome, nije potvrđena općenita valjanost predloženih koeficijenata modela pa primjena modela na druge lokacije zahtijeva dodatnu kalibraciju.

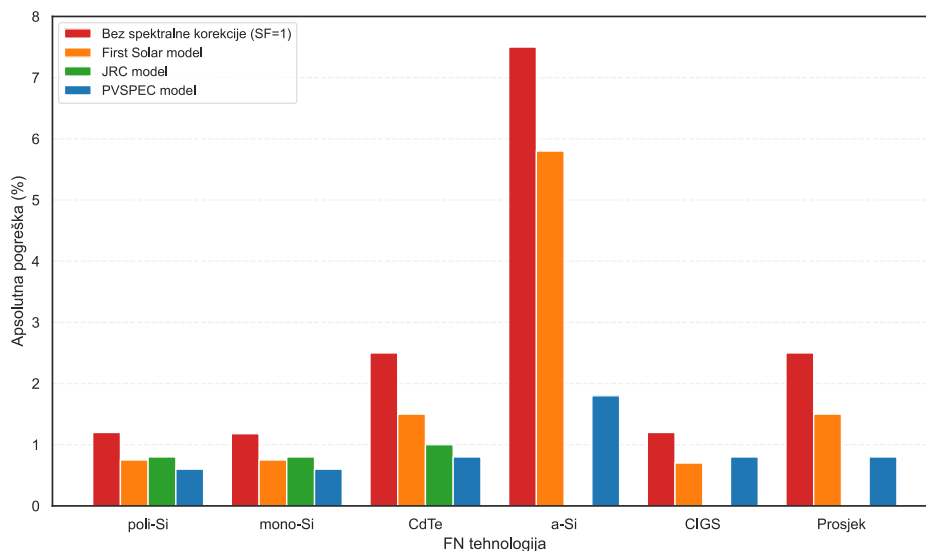
2.4.6. Usporedba modela spektralne korekcije: metodološki izazovi i praktična ograničenja

Usporedba postojećih modela spektralne korekcije predstavlja metodološki izazov jer su razvijeni heterogenim pristupima koji se razlikuju u filtriranju podataka, orijentaciji mjernih uređaja i odabiru lokacija za validaciju. Budući da su modeli često razvijeni i validirani na samo jednoj lokaciji sa specifičnim klimatskim karakteristikama, njihova primjenjivost u širem geografskom i klimatskom kontekstu ostaje upitna. Spektralna hijerarhija preciznosti je jasna: modeli temeljeni na parametrima dobivenim izravno iz spektralnih mjerenja pokazuju najveću točnost, što je i očekivano jer koriste maksimalnu količinu informacija. Međutim, praksa pokazuje da najveća preciznost često nije uparena s najvećom praktičnom primjenjivošću. Kontinuirana spektralna mjerenja dostupna su na jako ograničenom broju lokacija, što čini takve modele nepraktičnima za većinu korisnika FN sustava. To znači da u praksi najtočniji model nije uvijek i najprikladniji za krajnjeg korisnika koji nastoji primijeniti spektralnu korekciju na lokaciji gdje takvi podaci nisu dostupni. Nasuprot tome, jednostavniji modeli kao što je SAPM model koji je moguće implementirati poznajući samo jednostavnu solarnu geometriju, iznimno su praktični za širu primjenu. Njihova učinkovitost je zadovoljavajuća na lokacijama s malim postotkom oblačnih dana i niskom razinom aerosola, iako se i za ovaj parametar, baš kao i za *APE*, može uočiti potencijalni nedostatak bijektivne veze sa faktorom spektralne korekcije [111]. To upućuje na potrebu za kombiniranjem s drugim varijablama.

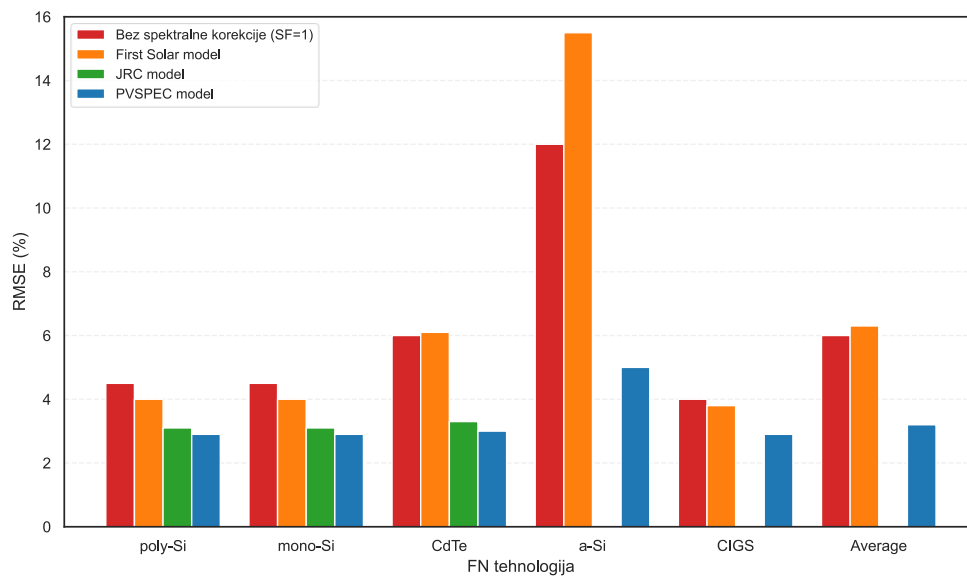
Na slikama 2.18 i 2.19 prikazana je usporedba nekoliko spektralnih korekcijskih modela (apsolutna pogreška i srednja kvadratna pogreška) na temelju informacija iz literature [72]. PVSPEC model je pokazao veću točnost od Spectral 2.0, iako ne koristi podatke o taložnoj vodenoj pari. Na slici 2.19 jasno se vidi da taj model ima najmanju srednju kvadratnu pogrešku za svih šest ispitanih FN tehnologija. Apsolutna pogreška svakog modela prikazana je na slici 2.18, koja pokazuje da PVSPEC model nadmašuje *AM_a-W* model za sve tehnologije osim za CIGS za koji su rezultati gotovo jednaki. Usporedba JRC i Spectral 2.0 modela pokazuje da je RMSE za JRC model niži unatoč nešto većoj apsolutnoj pogrešci, što sugerira da Spectral 2.0 možda modelira *SF* s manje učestalim, ali većim pogreškama.

Po rezultatima je također vidljivo da je PVSPEC model točniji od JRC modela. Nadalje, na temelju pregleda cjelokupne dostupne literature, te uzimajući u obzir činjenicu da je PVSPEC

$AM-K_t$ model razvijen i validiran na najvećem broju različitih geografskih lokacija, može se zaključiti da on razvijen koristeći posebno robustan pristup. Njegova praktična vrijednost potvrđena je integracijom u široko korištenu PVLIB Python biblioteku pa se uobičajeno koristi u inženjerskoj praksi.



Slika 2.18 Usporedba vrijednosti apsolutne pogreške za četiri SF modela.



Slika 2.19 Usporedba RMSE vrijednosti za četiri SF modela.

Što se tiče modela koji vrijede u uvjetima vedrog neba, predložena metoda $AM-W-AOD$ uspoređena je s postojećim SAPM modelom. Ova metoda pokazuje manje pogreške, s korijenom srednje kvadratne pogreške od 0,8% u usporedbi s 2,3% za AM model. Osnovni podaci o svim opisanim modelima dani su u tablici 2.7.

Tablica 2.7 Pregled postojećih modela spektralne korekcije.

Model	Korištene varijable	Validirane tehnologije
AM (Sandia SAPM)	AM_a	Mono-Si, poli-Si, a-Si, CdTe
First Solar (Nelson)	W	CdTe
First Solar (Spectral 2.0)	AM_a, W	Mono-Si, poli-Si, CdTe, a-Si
First Solar (Spectral 3.0)	AM_a, W, CSI	Mono-Si, poli-Si, CdTe
CIEMAT (Caballerov model)	AM_a, W, AOD	Mono-Si, poli-Si, CdTe, a-Si, CIGS, Perovskit
JRC	AM_a, Kt	Mono-Si, CdTe
PVSPEC	AM_a, Kt	Mono-Si, poli-Si, CdTe, a-Si, CIGS

2.5. Modeli za sintetiziranje spektra

Mjerenje spektra Sunčeva zračenja nije dio standardnih meteoroloških mjerenja, pa je stoga precizno sintetiziranje spektra pomoću modela iznimno važno. Naime, na ovaj način moguće je istraživanje utjecaja spektralnih varijacija na rad FN modula za velik broj lokacija. Postoji velik broj modela za sintetiziranje spektra. Modeli kao što su FASCODE i MODTRAN nude veliku spektralnu rezoluciju i preciznost, ali su računalno zahtjevni i potrebno je poznavanje velikog broja ulaznih podataka [127–129]. S druge strane, alati temeljeni na parametarskim funkcijama prijenosa i apsorpcije atmosferskih varijabli omogućuju jednostavnije simulacije Sunčeva spektra. Ovi modeli, kao što su SPCTRAL2, SEDES2 i SMARTS2, koriste funkcije prijenosa za atmosferske slojeve kako bi modificirali ekstraterestrički spektar i izračunali spektralnu raspodjelu zračenja koja dopire do Zemljine površine [130]. Parametarski modeli imaju niz prednosti: računalno su manje zahtjevni, znatno se brže izvode u odnosu na kompleksne kodove te zahtijevaju manji broj ulaznih podataka. Iako su manje spektralne razlučivosti (red veličine nanometra), često su dovoljno točni za FN primjene.

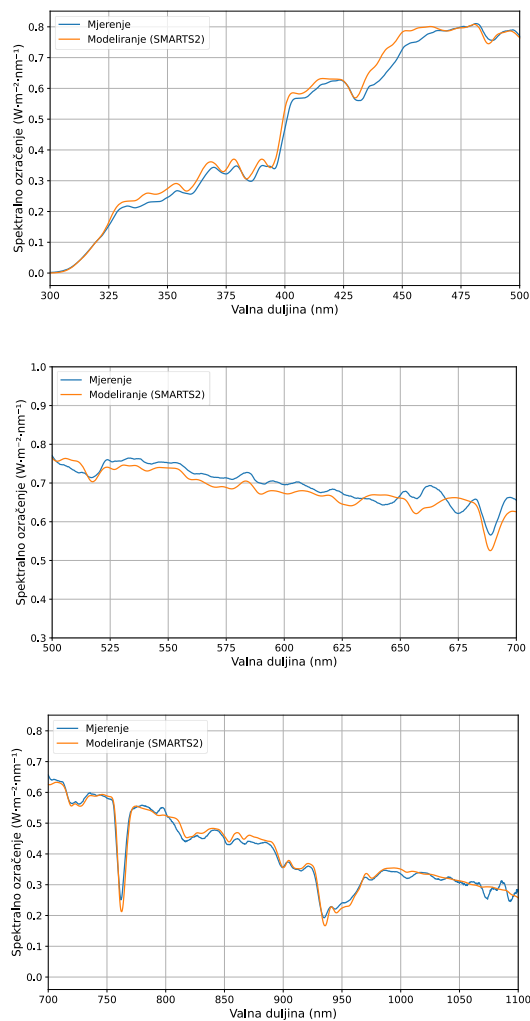
2.5.1. SMARTS2 model vedrog neba

SMARTS2 (engl. *Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine*) je među najčešće korištenim modelima za sintetiziranje spektra Sunčeva zračenja jer uspješno balansira preciznost i jednostavnost korištenja. Po točnosti je usporediv sa složenijim modelima, ali za rad treba znatno manje ulaznih podataka. To je potvrđeno usporedbom s kompleksnim MODTRAN modelom [92,128,131]. Omogućuje sintetiziranje spektra Sunčeva zračenja parametriziranjem prijenosnih funkcija za različite atmosferske komponente, uključujući Rayleighovo raspršenje, prigušenje aerosola i apsorpciju plinova poput ozona, vodene pare i dušikovog dioksida. Svi ovi fizikalni procesi i ulazni podaci za njihovo modeliranje prikazani su u tablici 2.8.

Tablica 2.8 Prijenosne funkcije u SMARTS2 modelu [92]

Atmosferska komponenta	Fizikalni proces	Ključni podaci	Spektralno područje
Rayleighovo raspršenje	Molekularno raspršenje	Lokalni tlak (P/P_0), zenitni kut Sunca (θ_z)	280-4000 nm
Ozon (O ₃)	Apsorpcija UV i vidljivog zračenja	Ukupna količina ozona (atm-cm), temperatura	280-850 nm
Vodena para (H ₂ O)	Vibracijski i rotacijski prijelazi	Relativna vlažnost, temperatura	720, 820, 940, 1130, 1380, 1880, 2700 nm
Uniformno miješani plinovi	Apsorpcija CO ₂ , O ₂ , CH ₄ , N ₂ O	Koncentracija plinova (ppmv), tlak, temperatura	762 nm (O ₂), 1400, 1600, 2000, 2700 nm (CO ₂)
Dušikov dioksid (NO ₂)	Apsorpcija u vidljivom dijelu spektra	NO ₂ (atm-cm)	400-600 nm
Aerosoli	Raspršenje i apsorpcija	AOD (500 nm), Ångströmov eksponent	280-4000 nm
Cirkumsolarno zračenje	Raspršenje u aureoli Sunca	Vidno polje, fazna funkcija, AOD	Sve valne duljine

SMARTS2 postiže visoku spektralnu rezoluciju, s vrijednostima od 0,5 nm ispod 400 nm, 1 nm u području od 400 do 1700 nm i 5 nm od 1700 do 4000 nm [128]. Mogućnost ovog modela da uzme u obzir promjene atmosferskih parametara, poput optičke dubine aerosola i taložne vodene pare, omogućuje primjenjivost na procjenu rada različitih FN tehnologija. U uvjetima vedrog neba SMARTS2 je neprikosnoven alat za modeliranje spektra, ali nije prikladan za analize u uvjetima promjenjive ili oblačne atmosfere. SMARTS2 je pokazao veću točnost od ostalih modela na podacima iz Valencije (Španjolska) [132]. Također, spektar sintetiziran SMARTS2 modelom pokazao je odlično slaganje s mjerenjima MS-711 uređaja u Splitu [22]. Istraživanje je dodatno potvrdilo sposobnost modela za procjenu faktora spektralne korekcije za različite FN tehnologije, s razlikama u rasponu od 0,2% za mono-Si do 1,9% za a-Si. Na slici 2.20. prikazana je usporedba između izmjenjenog i simuliranog spektra u rasponu 300-1100 nm za potpuno vedar dan 4. veljače 2025. u 14 sati.

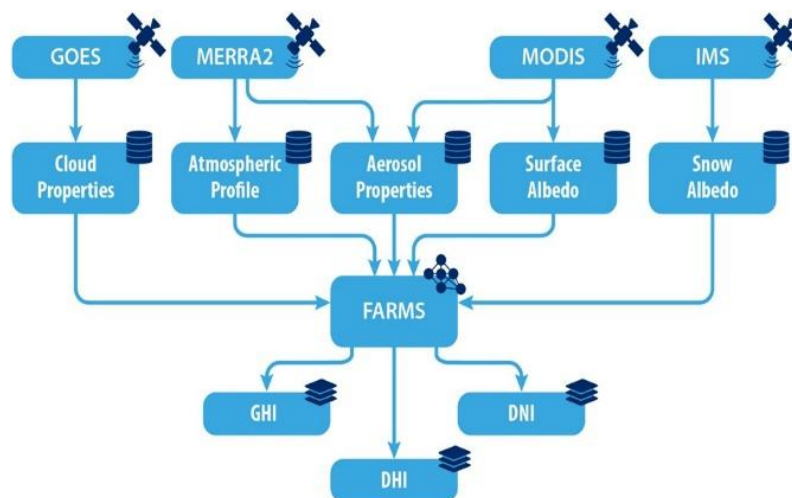


Slika 2.20 Usporedba mjerenog i sintetiziranog spektra za vedar dan na lokaciji Split, Hrvatska [22].

2.5.2. Programski alat FARMS-NIT

U novije vrijeme razvijeni su programski alati za sintetiziranje spektra za sve uvjete neba (engl. *all-sky conditions*). Jedan od takvih alata je FARMS-NIT, koji se za vedro nebo svodi na SMARTS2 [133,134]. Za oblačno vrijeme uključuje dodatne modele za što precizniji opis utjecaja oblaka na oblik spektra. Ovaj model je ukomponiran u NLR-ov sustav National Solar Radiation Database Spectral On-Demand [135]. FARMS-NIT generira spektralne vrijednosti na 2002 valne duljine u rasponu 280-4000 nm. Alat NSRDB Spectral On-Demand koristi FARMS-NIT kako bi generirao sintetičke spektre prilagođene specifičnim lokacijama, vremenskim intervalima i orijentacijama FN sustava. Sustav djeluje kao sučelje koje integrira FARMS-NIT izlaze s ulazima koje definira korisnik [136]. Za precizno modeliranje, alat kombinira atmosferske podatke MERRA-2, satelitski određene karakteristike oblaka i vrijednost albeda [137]. Za Europu i Afriku, koriste se podaci o oblacima iz Meteosat satelita (Meteosat-10 i Meteosat-11) [137]. Ovakav pristup jamči da sintetizirani spektri precizno odražavaju lokalne atmosferske i oblačne uvjete. To čini NSRDB Spectral On-Demand korisnim alatom za proračun utjecaja spektra na rad FN modula [120]. Na slici 2.21 prikazana je struktura NSRDB Spectral On-Demand programskog alata.

Ovaj programski alat nedavno je validiran kroz studije u kojima su uspoređeni sintetički spektralni podaci s mjerenjima na tlu na više lokacija. Obje studije utvrdile su da usluga pruža pouzdane i točne spektralne podatke za primjenu u modeliranju rada FN modula. Iako su uočene manje pogreške u obradi aerosola, dokazano je da alat pruža robusne, globalno primjenjive spektralne podatke [46,138].



Slika 2.21 Struktura NSRDB Spectral On-Demand programskog alata [136].

Postoji nekoliko primjera korištenja FARMS-NIT-a u svrhu istraživanja utjecaja spektra na rad FN modula. FARMS-NIT je upotrijebljen za generiranje spektra Sunčeva zračenja za određene lokacije u Sjevernoj i Južnoj Americi. Pokazano je da precizno modelira spektralnu varijabilnost specifičnu za lokaciju pod različitim atmosferskim uvjetima, osobito u klimatskim područjima s visokim razinama aerosola (obalna područja) ili značajnom naoblakom [30]. Također, jedan od modela spektralne korekcije razvijen je korištenjem ovog alata. Cilj je bio poboljšati prijašnji model uključivanjem utjecaja naoblake. Na ovaj način smanjene su pogreške u procjeni spektralne korekcije za 21-31% [48]. Gubici unutar FN modula zbog različitog spektralnog odziva ćelija unutar FN modula istraženi su korištenjem FARMS-NIT alata. U sklopu istraživanja uspoređeni su i rezultati dobiveni na sintetiziranom i mjerenom spektru za neke lokacije u SAD-u. Zaključeno je da FARMS-NIT ima zadovoljavajuću preciznost [139].

3. METODOLOGIJA ZA PROSTORNO-VREMENSKU SPEKTRALNU ANALIZU

Spektar Sunčeva zračenja se neprestano mijenja, i vremenski i prostorno. Tijekom jednog dana mijenja se s duljinom optičkog puta kroz atmosferu, pri čemu se spektralni sastav jutarnjeg ili večernjeg ozračenja znatno razlikuje od onog u satima najvećeg ozračenja. Također, varijacije su uvjetovane promjenjivošću atmosferskih čimbenika kao što su taložna vodena para, aerosoli i naoblaka. Prostorna dimenzija je također jako izražena. Europa pokazuje veliku klimatsku raznolikost, od sunčanog mediteranskog juga do hladnih i oblačnih sjevernih područja. Zbog toga svako od tih područja ima svoje specifične spektralne uvjete, koji se ne mogu vjerno opisati jednim univerzalnim referentnim spektrom.

Cilj ovog poglavlja je sustavno analizirati prostorno-vremenske varijacije spektra Sunčeva zračenja i njihov utjecaj na učinkovitost rada FN modula. U tu svrhu razvijena je metodologija koja obuhvaća širok skup europskih lokacija s različitim klimatskim značajkama. Analiza je provedena na vremenskim skalama od satnih vrijednosti do mjesečnih, godišnjih i međugodišnjih trendova. Prostorna komponenta analize omogućuje uvid u to kako se spektralni uvjeti mijenjaju ovisno o geografskom položaju i s time povezanim atmosferskim karakteristikama. Na temelju tih analiza lokacije se klasificiraju prema spektralnoj sličnosti, čime su proširene postojeće klimatske klasifikacije za FN module.

3.1. Metodološki okvir prostorno-vremenske spektralne analize

Prostorno-vremenska analiza spektralnog utjecaja na rad FN modula zahtijeva usklađen metodološki okvir koji obuhvaća nekoliko komponenti: odabir optimalnog kuta nagiba FN modula, reprezentativan odabir FN tehnologija s različitim spektralnim odzivima, sustavno pokrivanje klimatske raznolikosti europskog kontinenta odgovarajućim izborom lokacija te fizikalno utemeljenu sintezu spektralnog ozračenja za sve atmosferske uvjete. U ovom poglavlju opisane su sve četiri komponente ovog okvira.

3.1.1. Određivanje optimalnog kuta nagiba FN modula

Rad FN sustava uvelike je određen geometrijom njegove instalacije, pri čemu je kut nagiba modula važan parametar jer izravno utječe na upadno Sunčevo zračenje i posljedično na ukupni prinos energije. Optimalni kut nagiba često je postavljen kao ekvivalent geografskoj širini lokacije, što pruža razumnu aproksimaciju za lokacije srednjih geografskih širina [27,30]. U

ovoj je analizi za sve promatrane lokacije korišten optimalni kut nagiba određen pomoću PVGIS programskog alata [140]. Ukupno ozračenje na nagnutu plohu (engl. *global tilted irradiance - GTI*) najprije je izračunato standardnim postupkom transpozicije izravne, raspršene i reflektirane komponente na nagnutu plohu, pri čemu je za raspršenu komponentu primijenjen anizotropni Hay-Daviesov model [141]. Tako dobiven *GTI* korišten je u primjeni Huldovog modela za procjenu proizvodnje FN sustava [142]. Izlazna snaga modula izračunata je kao:

$$P_{dc} = G' \cdot [P_{dc,0} + k_1 \ln G' + k_2 \ln^2 G' + k_3 T' + k_4 T' \ln G' + k_5 T' \ln^2 G' + k_6 T'^2] \quad (3.1)$$

gdje je:

$$G' = \frac{G}{G_{ref}} \quad (3.2)$$

normalizirano efektivno ozračenje (u odnosu na standardnih 1000 W/m²), a:

$$T' = T_{modula} - 25^\circ C \quad (3.3)$$

je normalizirana temperatura modula u odnosu na standardnih 25 °C. $P_{dc,0}$ je snaga modula pri STC, a koeficijenti k_1 - k_6 su empirijski koeficijenti specifični za različite tehnologije FN modula.

Optimizacija kuta nagiba u PVGIS programskom alatu predstavlja iterativni proces maksimiziranja ukupne godišnje proizvodnje energije. Algoritam radi na sljedećim principima:

1. Inicijalizacija: Postavljanje početnog kuta nagiba $\beta_0 = 0^\circ$.
2. Iterativni proračun: Za svaki kandidat za kut nagiba β_i (gdje je $i=0, 1, 2, \dots, 90^\circ$) radi se:
 - Proračun ozračenja za svaki sat u godini
 - Primjena Huldovog modela za izračun P_{dc}
 - Izračun satne proizvodnje:

$$E_h = P_{dc} \cdot \Delta t \quad (3.5)$$

- Akumulirana godišnja energija:

$$E_{POA}^{ann} = \sum_{d=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} E_h \cdot (1 - L) \quad (3.6)$$

gdje je L ukupan faktor sustavnih gubitaka (tipično se postavlja na 14%), koji obuhvaća gubitke u kabelima, pretvaraču (inverteru), zaprljanosti modula, degradaciji i ostale manje gubitke.

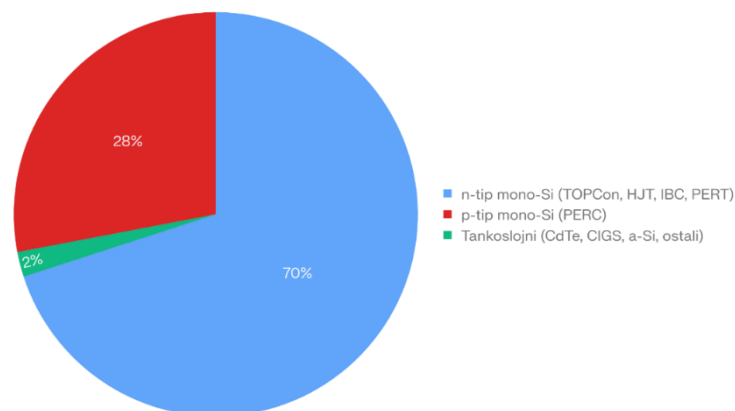
3. Optimalni kut nagiba koji maksimizira godišnju proizvodnju za svaku lokaciju se pronalazi rješavanjem optimizacijskog problema:

$$P_{dc} = \beta_{opt} = \arg \max_{\beta \in [0^\circ, 90^\circ]} E_{POA}^{ann} \quad (3.7)$$

3.1.2. Odabir i karakterizacija FN tehnologija

Kako je opisano u poglavlju 2.3, fotonaponski materijali razlikuju se po spektralnom odzivu. U okviru ovog istraživanja, spektralna karakterizacija provedena je za osam različitih fotonaponskih tehnologija. Obuhvaćene su sve tri generacije FN ćelija: od komercijalno dominantnih izvedbi monokristalnog silicija, preko tankoslojnih materijala pa do novijih materijala poput perovskita i kesterita.

Monokristalni silicij dominira globalnim FN tržištem s udjelom u instaliranoj snazi novih sustava od približno 98%, što je prikazano na slici 3.1. Zabranjeni pojas silicija od 1,12 eV postavlja graničnu valnu duljinu apsorpcije na oko 1100 nm, pa sve silicijske arhitekture apsorbiraju gotovo cijelo vidljivo i znatan dio NIR područja. Općenito, razlike u spektralnim odzivima posljedica su različitih načina proizvodnje i svojstava materijala [143]. Razlike među spektralnim odzivima kristalnih silicijskih FN ćelija ne proizlaze iz širine zabranjenog pojasa, već iz specifičnih struktura FN ćelija koje modificiraju spektralni odziv, naročito u UV i NIR području. Važno je napomenuti da dodatna nesigurnost u proračunu zbog razlika u spektralnim odzivima između modula istog tipa ili između pojedinih ćelija unutar modula ne utječe značajno na faktor spektralne korekcije i može biti zanemarena [24,137]. Utjecaj varijacija temperature na spektralni odziv i posljedično na faktor spektralne korekcije također je zanemariv [144].

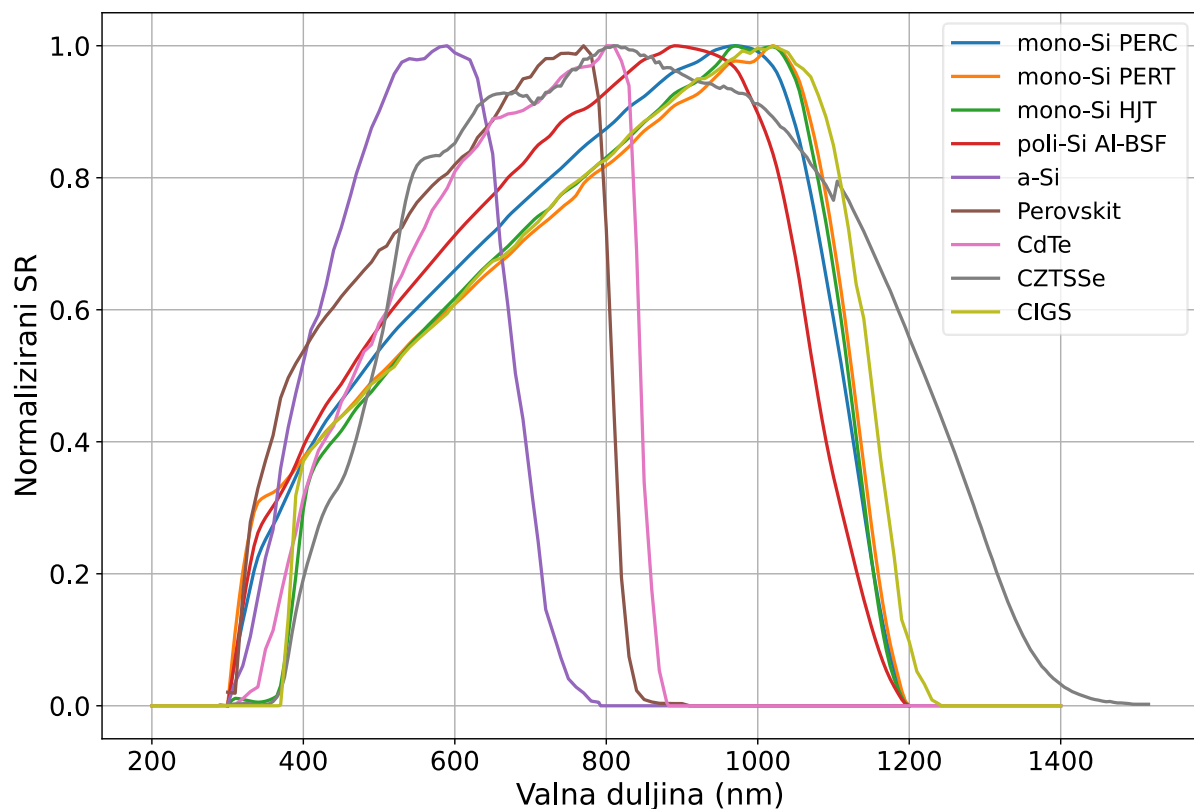


Slika 3.1 Tržišna zastupljenost FN tehnologija za 2024. godinu [143].

Sve FN tehnologije korištene u ovoj analizi i njihova svojstva prikazani su u tablici 3.1, a njihovi spektralni odzivi prikazani su na slici 3.2. Radi preglednosti i jednostavnije vizualne usporedbe između tehnologija, spektralni odzivi su normalizirani na jediničnu vrijednost korištenjem relacije 2.2.

Tablica 3.1 Razmatrane FN tehnologije.

Tehnologija	Proizvođač	Djelotvornost	Širina zabranjenog pojasa (eV)
Mono-Si PERC	Itek Energy	18%	1,12
Mono-Si N-tip PERT	LG	18,7%	1,12
Mono-Si N-tip HJT	Panasonic	19,4%	1,12
Poli-Si Al-BSF	Jinko Solar	16%	1,12
a-Si	Sharp	9%	1,84
Perovskit	Northwestern	25,2%	1,59
CdTe	First Solar	19%	1,47
CZTSSe	CREST	12%	1,3



Slika 3.2 Spektralni odzivi FN tehnologija korištenih u analizi.

U nastavku su ukratko opisane korištene silicijske tehnologije:

1. Monokristalni silicij s PERC arhitekturom (engl. *passivated emitter and rear cell*) bilježi značajan pad tržišnog udjela na približno 28% u 2024. godini, što je drastično smanjenje dominacije od preko 80% u 2022. uslijed brze tranzicije prema tehnologijama n-tipa. PERC tehnologija karakterizira se poboljšanim odzivom u NIR dijelu spektra zahvaljujući pasivaciji stražnje površine dielektričnim slojem koja smanjuje rekombinaciju nositelja naboja. Povećana interna refleksija na stražnjoj strani omogućuje veću efektivnu optičku putanju, čime se povećava vjerojatnost apsorpcije fotona valnih duljina 900-1100 nm koji bi inače prošli kroz silicij. Dodatno, dielektrični sloj specifično reflektira IR svjetlost iznad 1180 nm, što u starijim Al-BSF modulima dovodi do apsorpcije topline u metalnom kontaktu. Ove karakteristike rezultiraju komercijalnim efikasnostima od 20-22%, s laboratorijskim rezultatima koji prelaze 24% [144].
2. Monokristalni silicij s PERT arhitekturom (engl. *passivated emitter rear totally diffused*) predstavlja evoluciju klasičnog dizajna p-tipa u kojem se stražnja strana ćelije u potpunosti difuzijski obrađuje, uz dodatnu pasivizaciju, što smanjuje površinsku rekombinaciju u odnosu na Al-BSF tehnologiju i poboljšava naponske parametre. U spektralnom smislu PERT zadržava silicijsku graničnu valnu duljinu, ali omogućuje bolji odziv u srednjem i dugovalnom dijelu spektra (800-1100 nm) u usporedbi s tradicionalnim Al-BSF ćelijama, zahvaljujući smanjenim gubicima na stražnjem kontaktu i većoj efektivnoj optičkoj putanji fotona. Istovremeno, zbog drugačije optimizacije stražnjeg polja i kontakata u odnosu na PERC, odziv u UV i kratkovalnom području može biti nešto skromniji [145].
3. Višespojna tehnologija, mono-Si HJT (engl. *heterojunction technology*), koristi dva ili više materijala s različitim širinama zabranjenog pojasa i čini 7-8% globalnog tržišnog udjela s jednom od najbržih stopa rasta (>15% godišnje) i očekivanim dosegom od 12-15% do 2030. godine. Ovu tehnologiju karakterizira izvrsna pasivizacija kroz heterospoj i zadržava odličan odziv u NIR području s vrlo niskim rekombinacijskim gubicima, što rezultira efikasnostima većim od PERC i PERT tehnologija. Međutim, tanki slojevi amorfnog silicija i transparentnih vodljivih oksida nanošeni na kristalni silicij mogu uzrokovati parazitsku apsorpciju u UV području, što tipično uzrokuje smanjenje spektralnog odziva u tom dijelu spektra u odnosu na PERC [146].

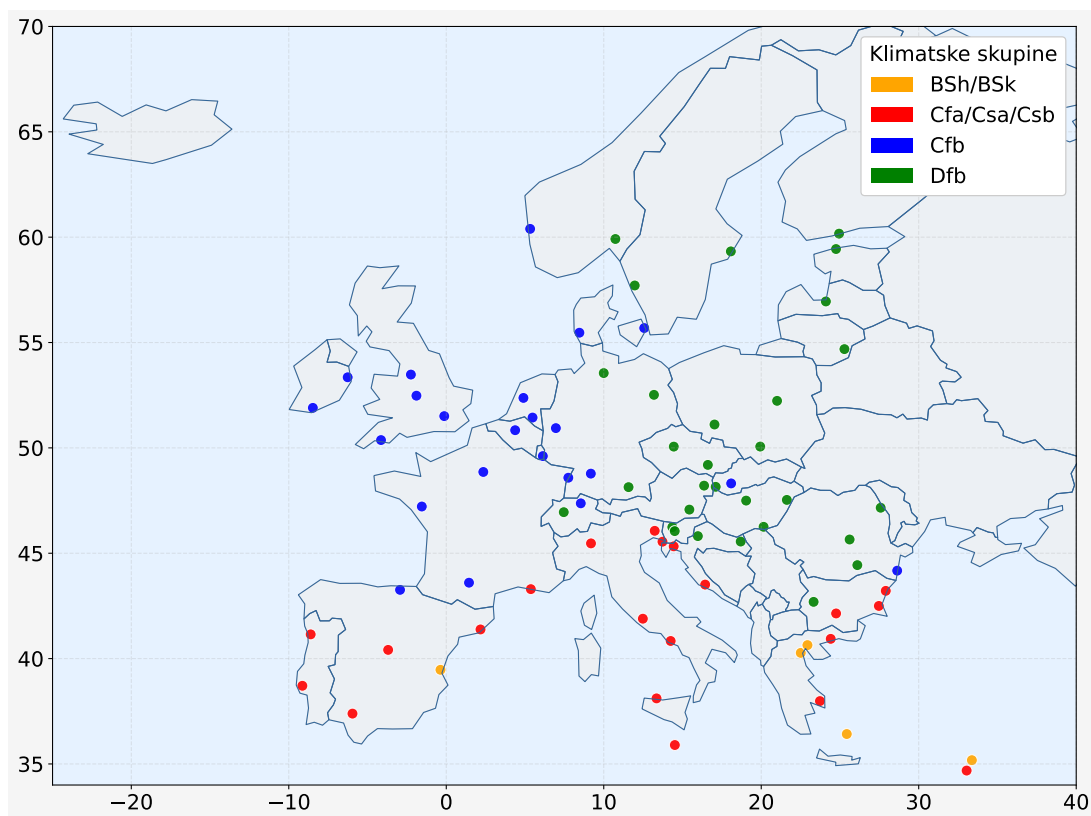
4. Polikristalni Al-BSF (engl. *aluminum back surface field*) u prijašnjim je desetljećima predstavljao industrijski standard, ali je danas praktički izbačen iz proizvodnje. Spektralni odziv mu je znatno lošiji od modernih tehnologija zbog izravnog kontakta aluminijskog sloja sa silicijem, što stvara brojne lokalne rekombinacijske centre u kojima se fotogenerirani nositelji poništavaju prije nego što se razdvoje. To dramatično smanjuje učinkovitost, posebno za fotone većih valnih duljina koji se apsorbiraju dublje u ćeliji, bliže problematičnom stražnjem kontaktu. Korištenje ove tehnologije u analizi je opravdano jer predstavlja prethodnu generaciju FN modula čiji sustavi i dalje čine značajan dio globalno instaliranih FN kapaciteta [147].

Tankoslojne tehnologije zajedno čine 2% udjela u ukupnoj proizvodnji energije iz FN sustava. Fundamentalno se razlikuju od silicija imajući izravne zabranjene pojaseve, veće koeficijente apsorpcije i uže spektralne odzive s naglim graničnim područjima. Tržišno je najzastupljeniji materijal CdTe (1,45 eV) s jakim odzivom u vidljivom dijelu spektra koji naglo slabi nakon 850 nm. Međutim, zbog manjih toplinskih gubitaka, pogodan je za primjenu u toplijim područjima [148]. Amorfni silicij (a-Si, 1,84 eV) ograničen je na vidljivi spektar (400-800 nm) sa zanemarivom NIR osjetljivošću. Zbog manje učinkovitosti puno se rjeđe koristi u konvencionalnim FN sustavima, ali zadržava se u primjenama gdje su potrebni savitljivost, mala masa i estetika [149]. Perovskiti s podesivom širinom zabranjenog pojasa (tipično 1,6-1,8 eV) pokazuju oštar pad spektralnog odziva nakon svoje granične valne duljine, što ih čini povoljnima za tandemske spojeve sa silicijem. U ovom doktorskom istraživanju korišten je $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, najčešće opisani tip perovskita u literaturi [150]. Kesteriti CZTSSe su karakterizirani s razvučenim rubom apsorpcije i slabijim odzivom u UV području [151]. Perovskiti i CZTSSe su još u ranim fazama komercijalizacije, ali pokazuju značajan potencijal, posebno perovskiti u tandem konfiguraciji sa silicijem.

Atmosferski uvjeti (masa zraka, aerosoli, taložna vodena para, naoblaka) selektivno mijenjaju raspodjelu Sunčeve energije po valnim duljinama. Silicijske tehnologije s dobrom NIR osjetljivošću imaju prednost kada se spektar pomakne prema crvenom području (viša masa zraka), dok tehnologije sa širim zabranjenim pojasom (a-Si, perovskiti, CdTe) mogu biti učinkovitije u uvjetima plavog svjetla (niža vrijednost mase zraka, oblačni uvjeti i sl.). Razlike u iskorištavanju NIR područja i gubicima u UV dijelu spektra među arhitekturama silicijskih ćelija postaju važne u prostorno-vremenskoj analizi.

3.1.3. Odabir lokacija za analizu

Kako bi se sustavno analizirala promjenjivost spektra Sunčeva zračenja i posljedično načina na koji ta promjenjivost utječe na rad FN tehnologija, analizirano je 79 lokacija širom Europe odabranih prema Köppen-Geiger klimatskoj klasifikaciji [152]. Na taj se način osigurava reprezentativnost uzorka s obzirom na regionalnu klimatsku raznolikost, gdje su lokacije strateški odabrane kako bi se obuhvatila kontinentalna, mediteranska, oceanska i suha klima. Grafički prikaz svih lokacija na mapi Europe dan je na slici 3.3. Za zemlje s više klimatskih zona, zastupljene su reprezentativne lokacije za svaku kategoriju, dok je za veće zemlje, koje obuhvaćaju veći raspon geografskih širina (Francuska, Njemačka, Italija, Španjolska), razmatrano više lokacija unutar iste klimatske zone kako bi se obuhvatile i intra-klimatske varijabilnosti po geografskoj širini. Četiri ključne klimatske grupe obuhvaćaju: suhe stepske klime (BSh i BSk), mediteransku klimu sa sezonskim razlikama u padalinama (Cfa, Csa i Csb), oceansku umjerenu klimu (Cfb) i vlažnu kontinentalnu klimu (Dfb). Takva podjela zasnovana je na glavnim meteorološkim parametrima koji utječu na Sunčev spektar kao što su suhoća, mediteranska sezonalnost, oceanski režimi oblačnosti i kontinentalni temperaturni ekstremi. Popis svih analiziranih lokacija dan je u Prilogu A, u tablici A.1.



Slika 3.3 Prikaz lokacija korištenih u analizi spektralnih varijacija te pripadajuća klimatska klasifikacija prema Köppen-Geigeru.

3.1.4. Sintetiziranje spektra

U sklopu ovog istraživanja, za generiranje spektralnog ozračenja korišten je FARMS-NIT model implementiran u NLR-ovom programskom alatu NSRDB Spectral On-Demand. Opis navedenog alata dan je u poglavlju 2.5.2. Za svaku od 79 lokacija, korišten je NSRDB Spectral On-Demand alat kako bi se generirali satni spektri globalnog ozračenja u ravnini optimalno nagnutog modula za cijelu kalendarsku godinu. Modeliranje je provedeno sa sljedećim specifičnim postavkama, prilagođenim ciljevima istraživanja:

1. Vremenski raspon: Cjelogodišnji satni podaci
2. Spektralni raspon: 280-4000 nm, diskretiziran u 2002 uskopojasna kanala
3. Orijehtacija i nagib: Za svaku lokaciju korišten je optimalni kut nagiba izračunat PVGIS alatom (opisano u poglavlju 3.1.1.), dok je azimut postavljen na 0° (orijentacija prema jugu)
4. Atmosferski i okolišni ulazi: Model je integrirao sljedeće podatke visoke razlučivosti za svaku lokaciju i vremenski trenutak:
 - Atmosferski sastav: Podaci o koncentraciji aerosola, ozona i vodene pare iz MERRA-2 baze podataka
 - Oblaci: Karakteristike oblaka određene satelitskim snimkama s Meteosat-10 i Meteosat-11 satelita, osiguravajući reprezentativne podatke za Europu
 - Albedo: Vrijednosti albeda površine temeljene na mjerenjima MODIS instrumenta

Ovako konfiguriran, FARMS-NIT model generirao je spektre za sve vremenske uvjete, uzimajući u obzir lokalnu atmosfersku dinamiku i njezin selektivni utjecaj na spektralnu raspodjelu Sunčeva zračenja.

3.2. Analiza spektralne varijabilnosti korištenjem prosječne energije fotona

3.2.1. Prosječni ponderirani spektar europskih lokacija

Podaci sa svih obrađenih lokacija uključuju satne podatke o sintetiziranom spektralnog ozračenju u cijelom Sunčevom spektru od 280 do 4000 nm. Iz ovog opsežnog skupa podataka izveden je prosječni spektar ponderiran ozračenjem kroz pristup u kojem je doprinos svake lokacije ponderiran prema ukupnom Sunčevom ozračenju. Ovaj metodološki izbor je temeljno

značajan jer spektralna mjerenja s većim ukupnim ozračenjem proporcionalno više doprinose konačnom prosječnom spektru, čime se on efektivno pretvara u energetski reprezentativni profil umjesto obične aritmetičke sredine.

Prosječni spektar izračunat je korištenjem svih satnih vrijednosti spektra sa svih lokacija, uklonjeni su samo trenuci niske razine ozračenja ($G < 50 \text{ W/m}^2$):

$$\bar{E}(\lambda) = \frac{\sum_{i=1}^N G_i E_i(\lambda)}{\sum_{i=1}^N G_i} \quad (3.8)$$

gdje je N broj ukupnih pojedinačnih spektara koji su uključeni u proračun, $E_i(\lambda)$ satna vrijednost i -tog spektralnog ozračenja na valnoj duljini λ , a G_i ukupno ozračenje za lokaciju i . Ukupno ozračenje za lokaciju moguće je izračunati integracijom spektralnog ozračenja po svim valnim duljinama:

$$G_i = \int_{280 \text{ nm}}^{4000 \text{ nm}} E_i(\lambda) d\lambda \quad (3.9)$$

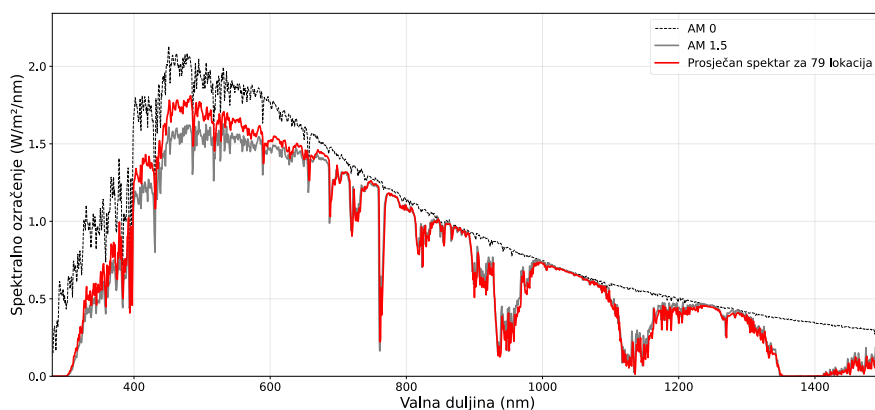
odnosno u diskretnom obliku korištenjem trapeznog pravila:

$$G_i = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{M-1} [E_i(\lambda_k) + E_i(\lambda_{k+1})] \cdot (\lambda_{k+1} - \lambda_k) \quad (3.10)$$

Nakon dobivanja ponderiranog prosječnog spektra, izvršena je normalizacija na ukupno ozračenje od 1000 W/m^2 kako bi se omogućila relevantna usporedba sa standardnim AM 1,5 spektrom, čime se analizira čista spektralna distribucija bez utjecaja apsolutnog iznosa ozračenja:

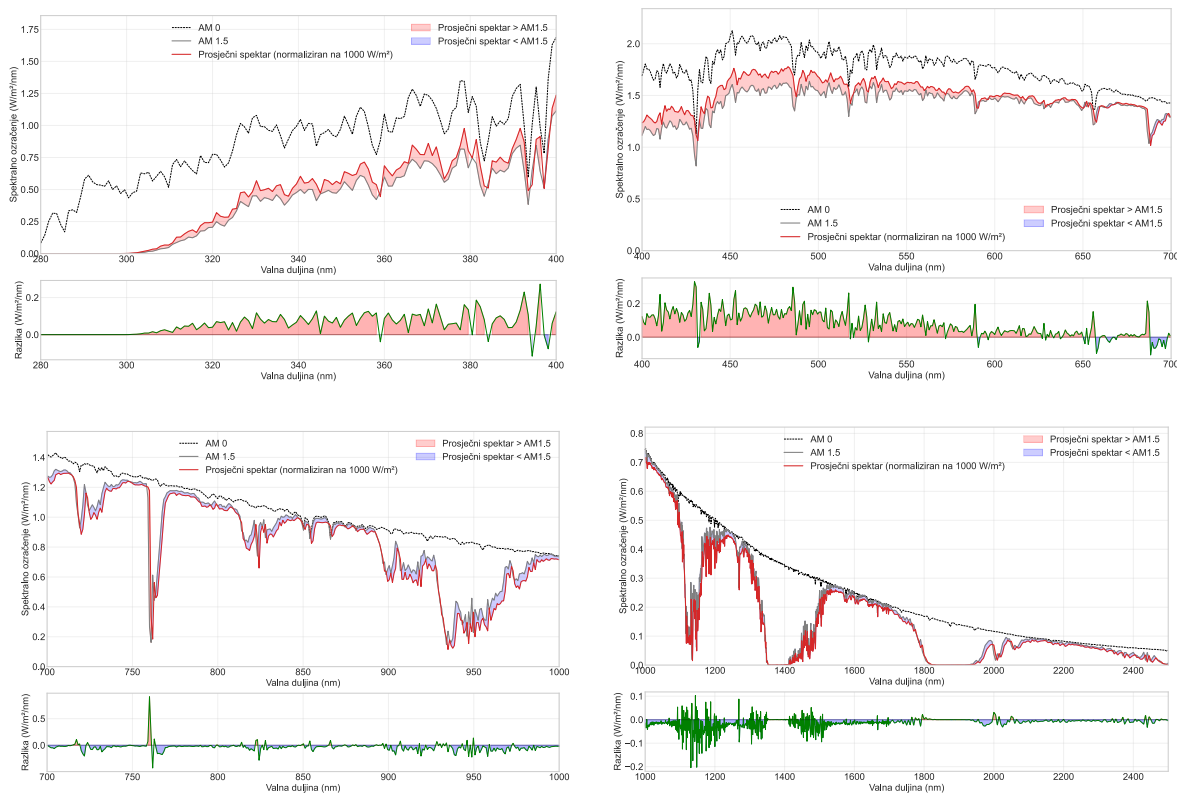
$$E_{norm}(\lambda) = \bar{E}(\lambda) \cdot \frac{1000}{\int \bar{E}(\lambda) d\lambda} \quad (3.11)$$

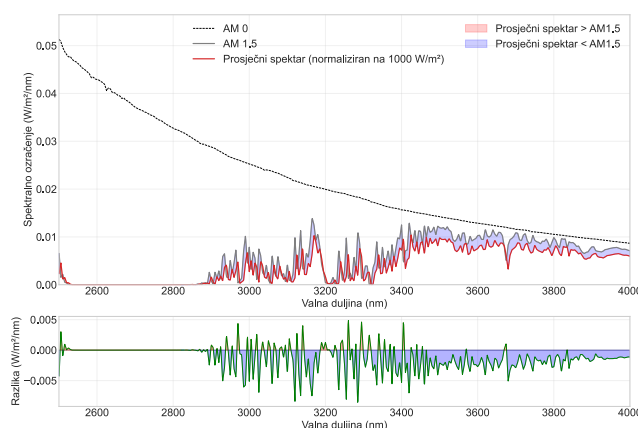
gdje je $E_{norm}(\lambda)$ normalizirani spektar na 1000 W/m^2 , a integral prosječnog spektra u nazivniku predstavlja ukupno integrirano ozračenje prije normalizacije. Na slici 3.4 prikazana je usporedba standardnog AM 1,5 spektra i prosječnog ponderiranog spektra za 79 razmatranih europskih lokacija u rasponu valnih duljina od 280 do 1500 nm. Iz prikazanog grafikona jasno je vidljivo da se ova dva spektra značajno razlikuju, što predstavlja prvi dokaz da AM 1,5 referentni spektar često ne odražava stvarne uvjete spektralnog ozračenja na terenu. Uočava se da u UV i vidljivom dijelu spektra prosječni ponderirani spektar postiže veće vrijednosti ozračenja, dok u bliskom infracrvenom (NIR) području AM 1,5 spektar ima nešto veće vrijednosti.



Slika 3.4 Prosječni spektralni ponderiran prema ukupnom ozračenju, standardni AM 1,5 spektralni i ekstraterestrički AM 0 spektralni.

Na slici 3.5 ista je usporedba dodatno razložena po segmentima valnih duljina (UV, vidljivo, NIR, prijelaz NIR-SWIR i SWIR) uz prikaz razlike između prosječnog europskog ponderiranog i standardnog AM 1,5 spektra. Jasno je vidljivo da je prosječni europski spektralni značajno veći od AM 1,5 spektra sve do približno 700 nm, odnosno do kraja vidljivog dijela, nakon čega AM 1,5 spektralni počinje dominirati. Time se potvrđuje da je prosječni europski spektralni sustavno pomaknut prema plavom dijelu spektra, odnosno prema kraćim valnim duljinama. Na temelju ovih rezultata bilo bi moguće definirati i alternativni referentni spektralni reprezentativan za tipične radne uvjete u europskim klimatskim uvjetima.





Slika 3.5 Usporedba prosječnog europskog ponderiranog spektra i standardnog AM 1,5 spektra podijeljena po više segmenata valnih duljina.

Osim izravne usporedbe oblika spektra, za prethodno dobiveni prosječni europski spektar izračunata je i prosječna energija fotona (APE), definirana u poglavlju 2.5, kako bi se njegov pomak prema kraćim valnim duljinama dodatno kvantitativno potvrdio. APE je faktor koji je često korišten za karakterizaciju spektralne distribucije Sunčeva zračenja pomoću jedne vrijednosti te pruža kvantitativnu mjeru o tome je li 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. Prosječna energija fotona definirana je izrazom 2.9, a ponderirana prosječna energija fotona za određenu lokaciju računa se prema sljedećoj relaciji:

$$\overline{APE} = \frac{\sum_{i=1}^N G_i APE_i}{\sum_{i=1}^N G_i} \quad (3.12)$$

gdje je G_i Sunčevo ozračenje u vremenskom periodu i , a APE_i prosječna energija fotona u tom periodu. Analogno ponderiranom spektru objašnjenom u prethodnom poglavlju, ovaj pristup osigurava da vremenski periodi s većim energetske doprinosima proporcionalno utječu na konačnu vrijednost. Na taj način dobiva se energetske reprezentativna mjera spektralne kvalitete za analizirano vremensko razdoblje, što može biti sat (kao u ovom slučaju), dan, mjesec, godina ili bilo koje drugo razdoblje od interesa za analizu. Za srednji europski spektar, dobiven integracijom i ponderiranjem svih 79 lokacija za cijelu godinu (prostorno-vremenski), izračunata vrijednost APE -a iznosi 1,904 eV, što je znatno više od vrijednosti APE -a standardnog AM 1,5 spektra koji iznosi 1,876 eV. Detaljne tablice usporedbe nalaze se u prilogu A.

3.2.2. Prostorna analiza prosječne energije fotona

U sljedećem koraku prosječna energija fotona analizira se na prostornoj razini, po pojedinačnim lokacijama, pri čemu je osobito zanimljivo najprije ispitati kako se godišnje ozračenjem ponderirane vrijednosti *APE-a* mijenjaju s geografskom širinom. Slike 3.6 i 3.7 predstavljaju analizu godišnjih vrijednosti *APE-a* kao funkcije geografske širine za cjelokupan skup od 79 europskih lokacija koje se nalaze između $34,7^\circ$ i $60,4^\circ$ geografske širine. Na slici 3.6 prikazana je ovisnost *APE-a* o geografskoj širini za sve meteorološke uvjete - kompletan godišnji skup podataka koji uključuje vedro vrijeme, djelomično oblačno vrijeme i potpuno oblačno vrijeme. Slika 3.7 prikazuje istu ovisnost, ali isključivo za uvjete vedrog neba, čime se izolira spektralna dinamika Sunčeve svjetlosti u odsustvu utjecaja oblaka i omogućava izravna procjena atmosferskih optičkih svojstava.

Obje slike jasno demonstriraju izraženu negativnu korelaciju između godišnjeg *APE-a* i geografske širine, što potvrđuje fundamentalnu fizikalnu vezu između geografske pozicije, Sunčeve elevacije i optičke putanje kroz atmosferu. Za sve meteorološke uvjete (slika 3.6), Pearsonov korelacijski koeficijent iznosi $r = -0,708$, što ukazuje na snažan inverzan odnos: kako se geografska širina povećava (krećemo li se od Mediterana prema Skandinaviji), godišnja vrijednost *APE-a* sistematski opada. Međutim, ta negativna korelacija postaje puno izraženija kada analiziramo isključivo uvjete vedrog neba (slika 3.7), gdje korelacijski koeficijent dostiže $r = -0,865$ - povećanje jačine korelacije od 22,3%. Ova pojačana povezanost u uvjetima vedrog neba otkriva dominantnu fizikalnu ovisnost: geografska širina određuje prosječnu visinu Sunca na obzoru kroz godinu, koja pak izravno kontrolira AM (optičku putanju) kroz koju Sunčeva zraka putuje. U odsustvu „ublažavajućeg“ utjecaja oblaka veza između geografske širine i *APE-a* postaje jača i podložnija preciznom fizikalnom tumačenju.

Iz analize uvjeta vedrog neba evidentno je da čak 17 lokacija (21,5% cjelokupnog uzorka) pokazuje da su njihove godišnje prosječne *APE* vrijednosti za uvjete vedrog neba manje od vrijednosti standardnog referentnog spektra AM 1,5 ($APE = 1,876$ eV). Ove lokacije su geografski koncentrirane u rasponu između $50,9^\circ$ i $60,4^\circ$ geografske širine - regiji koja obuhvaća lokacije poput Kölna, Londona, Dublina, Amsterdama, Copenhagena, Stockholma, Osla i Bergena. To otkriće ima spektralnu interpretaciju: za te lokacije na visokim geografskim širinama, godišnje prosječne spektralne distribucije Sunčevih zraka tijekom uvjeta vedrog vremena su pomaknute prema dužim valnim duljinama i infracrvenom području spektra u odnosu na referentni AM 1.5 spektar. Spektar je, dakle, relativno „crven“, a to znači manji udio fotona viših energija (kraćih valnih duljina), a veći udio fotona nižih energija (većih valnih

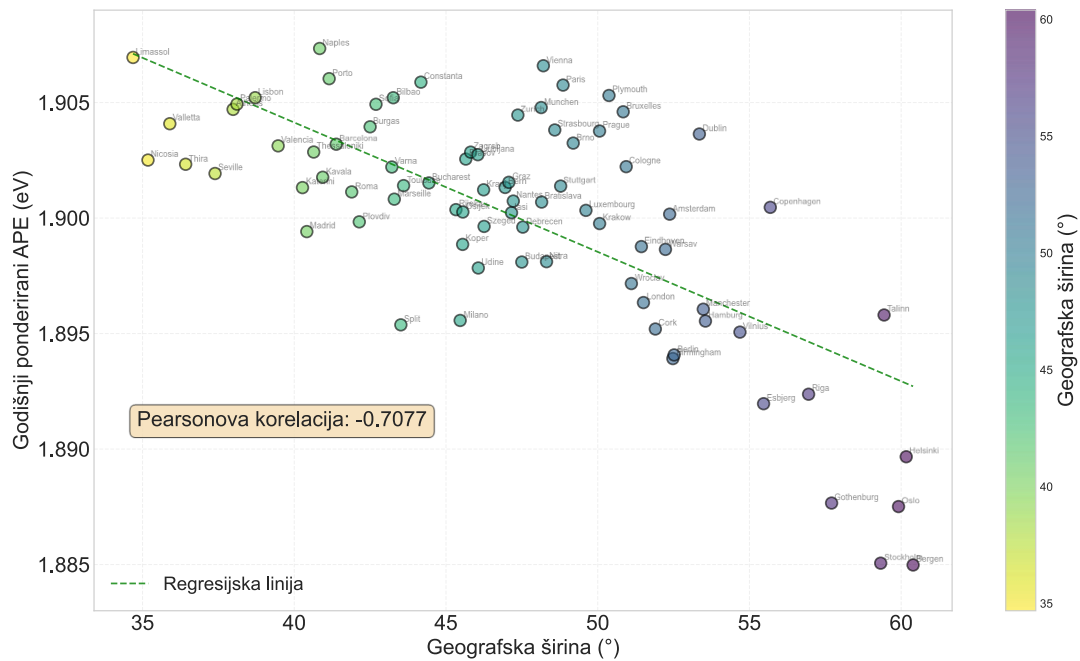
duljina). Za FN primjenu, to sugerira da će FN moduli s većim energijama zabranjenog pojasa (tankoslojne tehnologije) na tim lokacijama tijekom vedrog vremena imati spektralno manje povoljan izvor fotona nego kod AM 1,5 spektra.

Još značajnija spoznaja proizlazi iz analize razlike između godišnjeg APE-a za sve uvjete neba i godišnjeg APE-a za isključivo vedro nebo. Ta razlika pokazuje izrazitu geografsku ovisnost s pozitivnom korelacijom s geografskom širinom ($r = +0,709$), što znači da uključivanje oblačnih uvjeta više povećava *APE* na višim geografskim širinama nego na južnijim lokacijama. Kvantitativna analiza po geografskim pojasevima to jasno demonstrira:

1. 35-40 °N (Mediteran): $\Delta APE = 0,0086 \pm 0,0029$ eV ($0,45 \pm 0,15\%$) - najmanja razlika
2. 40-45 °N (Južna i srednja Europa): $\Delta APE = 0,0113 \pm 0,0027$ eV ($0,60 \pm 0,14\%$)
3. 45-50 °N (Srednja Europa): $\Delta APE = 0,0167 \pm 0,0037$ eV ($0,89 \pm 0,20\%$)
4. 50-55 °N (Sjeverna Europa): $\Delta APE = 0,0275 \pm 0,0070$ eV ($1,47 \pm 0,38\%$) - najveća razlika
5. 55-60 °N (Skandinavija): $\Delta APE = 0,0213 \pm 0,0049$ eV ($1,14 \pm 0,26\%$)

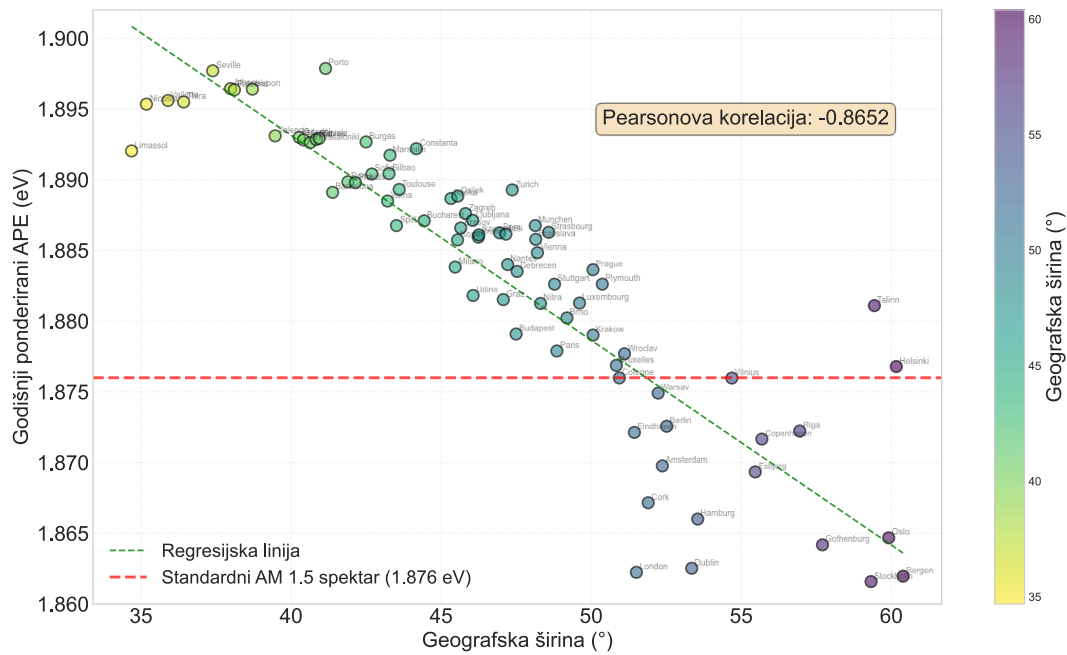
Lokacije na širinama 50-55 °N pokazuju do 3,2 puta veću razliku u APE vrijednosti između svih uvjeta neba i vedrog neba nego najjužnije lokacije (35-40°N). Naime, na visokim geografskim širinama, oblačnost je klimatski češća, a oblaci djeluju kao filter koji povećava udio raspršenog zračenja snažno pomaknutog prema plavom dijelu spektra. Stoga, iako vedro nebo na visokim geografskim širinama proizvodi spektre pomaknute prema crvenom s relativno niskim *APE* vrijednostima, uključivanje oblačnih perioda spektralno izjednačuje godišnji prosjek, povećavajući ukupni ponderirani *APE*. Nasuprot tome, na južnijim lokacijama, oblačnost je klimatski rijetka, a većina godišnjeg ozračenja je koncentrirana u vedrim periodima, što znači da oblačni dani ne nose dovoljnu težinu da bi značajno promijenili godišnji ponderirani *APE*.

Mediterranske lokacije (35-40°N), kao što su Limassol, Nicosia, Valletta i Seville, pokazuju najmanju razliku između *APE* vrijednosti za sve uvjete neba i vedrog neba (prosječno samo 0,45%). To je izravna posljedica njihove klimatske karakteristike: veliki broj sunčanih dana godišnje znači da je većina godišnjeg ozračenja već koncentrirana u vedrim ili jasnim periodima, pa uključivanje manjeg broja oblačnih dana ne mijenja značajno godišnji ponderirani spektar. Obrnuto, lokacije između 50° i 55°N - koje uključuju London, Dublin, Amsterdam, Hamburg i Berlin - pokazuju najveću relativnu razliku (prosječno 1,47%), što



Slika 3.6 Prikaz odnosa prosječne energije fotona i geografske širine za svih 79 lokacija za sve uvjete neba.

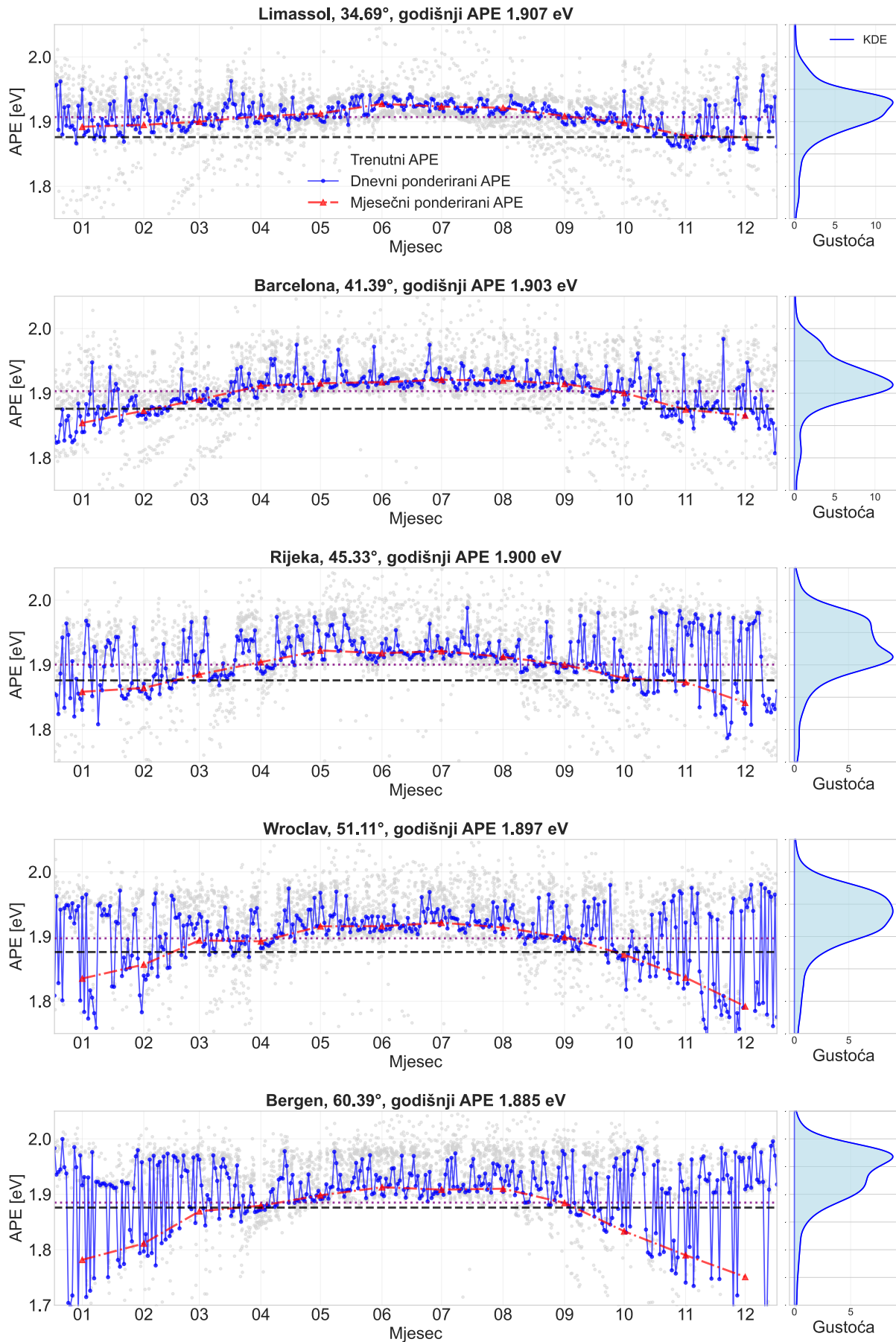
odražava njihovu klimu s čestom oblačnošću i značajnim sezonskim varijacijama u masi zraka. Za daljnju analizu sezonske dinamike *APE*-a odabrano je pet reprezentativnih lokacija koje pokrivaju širok raspon geografskih širina, od Limasola na jugu (34°N) do Bergena na sjeveru (60°N). Prikazane slike ilustriraju vremenski razvoj prosječne energije fotona (*APE*) za ovih pet lokacija tijekom cijele godine. Na slici 3.8 vidljive su simultano tri vremenske razine podataka: satne vrijednosti *APE*-a (prikazane kao raspršeni podaci u sivoj boji), dnevni ponderirani prosjeci (plava linija s markerima) te mjesečni ponderirani prosjeci (crvena linija s markerima). S desne strane svakog panela dodatno je prikazana i KDE distribucija (engl. *kernel*



Slika 3.7 Prikaz odnosa prosječne energije fotona i geografske širine za svih 79 lokacija za vedro nebo.

density estimation), koja predstavlja izgladeni prikaz histograma i pokazuje u kojem se rasponu vrijednosti APE-a najčešće pojavljuju tijekom godine, čime se dobiva sažet uvid u tipičnu raspodjelu spektralne kvalitete na svakoj lokaciji. Takva kombinacija vremenskih serija i KDE distribucija omogućava vizualnu procjenu varijabilnosti unutar dana i mjeseca, ali i prepoznavanje dominantnih APE režima na godišnjoj skali.

Na slici 3.9, radi veće preglednosti i fokusiranja na značajnije oscilacije, prikazane su isključivo mjesečne vrijednosti za svih pet lokacija na jednom grafikonu, što omogućava izravnu usporedbu vremenskog razvoja APE-a između lokacija kroz godinu. Iz predstavljenih podataka jasno se uočavaju izražene sezonske razlike u vrijednostima APE-a na svim lokacijama. Svaka od pet lokacija pokazuje vrlo sličan oblik krivulje za mjesečne vrijednosti, s maksimumima tijekom ljetnih mjeseci i minimumima tijekom zimskih mjeseci. Ta sezonska oscilacija značajno se povećava kako se krećemo prema većim geografskim širinama: dok Limassol pokazuje relativno umjerene godišnje fluktuacije, Bergen ima dramatičnu razliku između ljetnih i zimskih vrijednosti, što je izravna posljedica velike varijacije mase zraka i promjene putanje Sunčeve zrake kroz atmosferu tijekom godine. Dnevne APE vrijednosti za svih pet lokacija pokazuju veće fluktuacije koje postaju posebno izražene prema većim geografskim širinama, gdje se pojedini dnevni vrhunci s povećanom APE vrijednosti jasno izdvajaju kao izrazito oblačni dani (nizak K_t). Mjesečni ponderirani prosjeci pritom se konzistentno

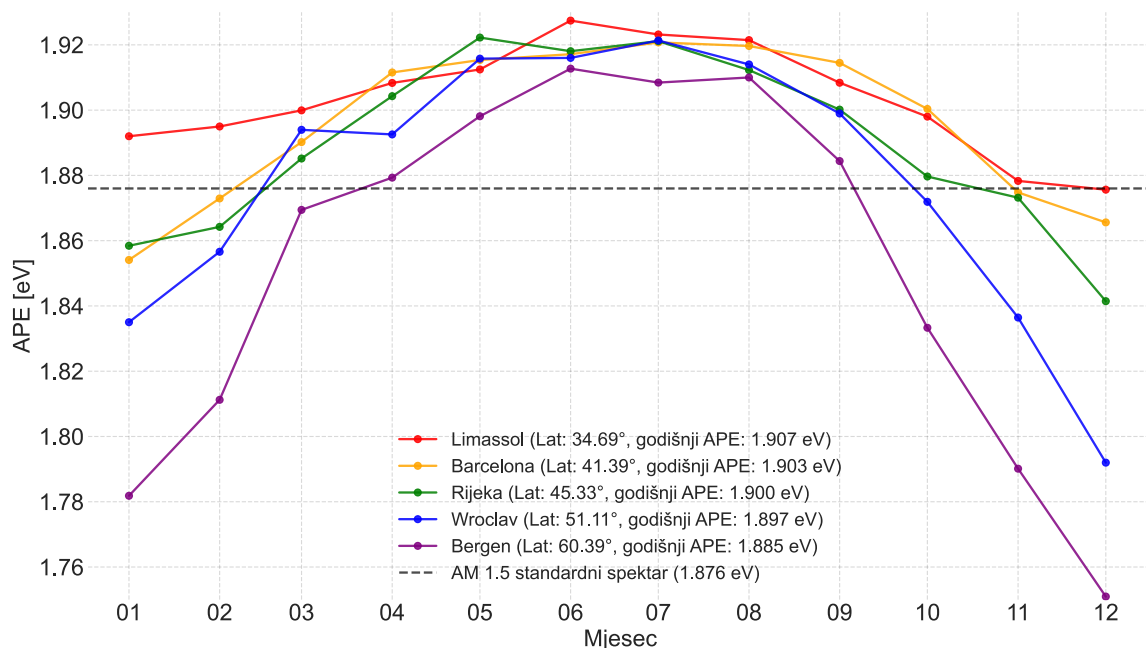


Slika 3.8 Trenutne, dnevne i mjesečne vrijednosti APE-a za pet lokacija.

pozicioniraju blizu nižih dnevnih vrijednosti, što ukazuje da su vedri dani s manjim *APE* vrijednostima ujedno i dani s većim ukupnim ozračenjem te dominiraju u konačnoj mjesečnoj bilanci.

Tijekom ljetnih mjeseci, kada je Sunce visoko na nebu, *AM* dostiže svoje minimalne vrijednosti. To znači da Sunčeva zraka prolazi kroz manji sloj atmosfere prije nego što dosegne površinu, što rezultira manje izraženim raspršenjem i manjim apsorpcijskim gubicima u IR području. Kao rezultat, spektralna distribucija Sunčeva zračenja pomiče se prema kraćim valnim duljinama, što je osnovni fizikalni mehanizam koji stoji iza povećanih *APE* vrijednosti tijekom ljetnog perioda. Obrnuto, tijekom zimskih mjeseci, kada je Sunce nisko na obzoru, *AM* je veća, što uzrokuje duži put kroz atmosferu, intenzivnije raspršenje i snažniju apsorpciju u IR području. Takva promijenjena spektralna distribucija, s većim udjelom dugih valnih duljina, dovodi do smanjenih *APE* vrijednosti, fenomen koji je naročito izražen na visokim geografskim širinama gdje je zimska visina Sunca niska.

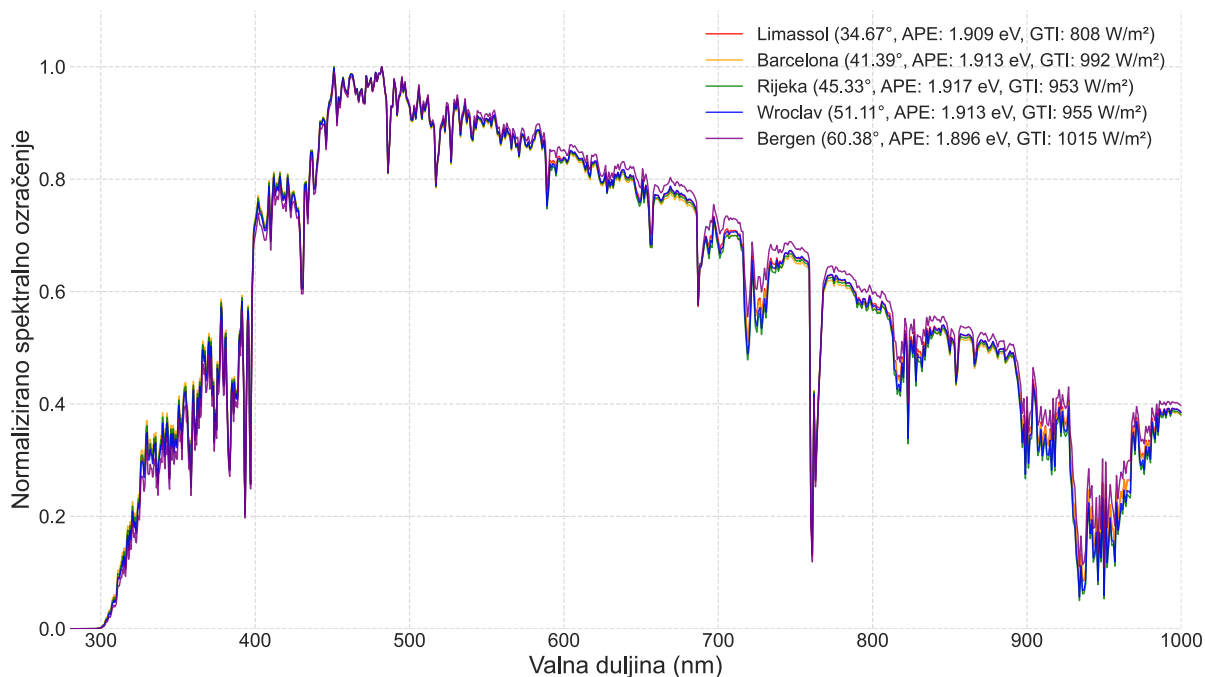
Odnos između *APE* i atmosferskih uvjeta dodatno je složen zbog interakcije između vedrine neba i taložne vodene pare. Oblačno vrijeme općenito daje više vrijednosti *APE*-a, što se može objasniti selektivnom apsorpcijom u infracrvenom području zbog većih količina taložne vodene pare, kao i većim udjelom raspršenog zračenja koje je spektralno pomaknuto prema plavom dijelu spektra. Vodena para selektivno oslabljuje NIR dio spektra, čime relativno povećava udio kratkovalnog zračenja i povećava *APE*. Ipak, ključno je kako se ti efekti raspoređuju



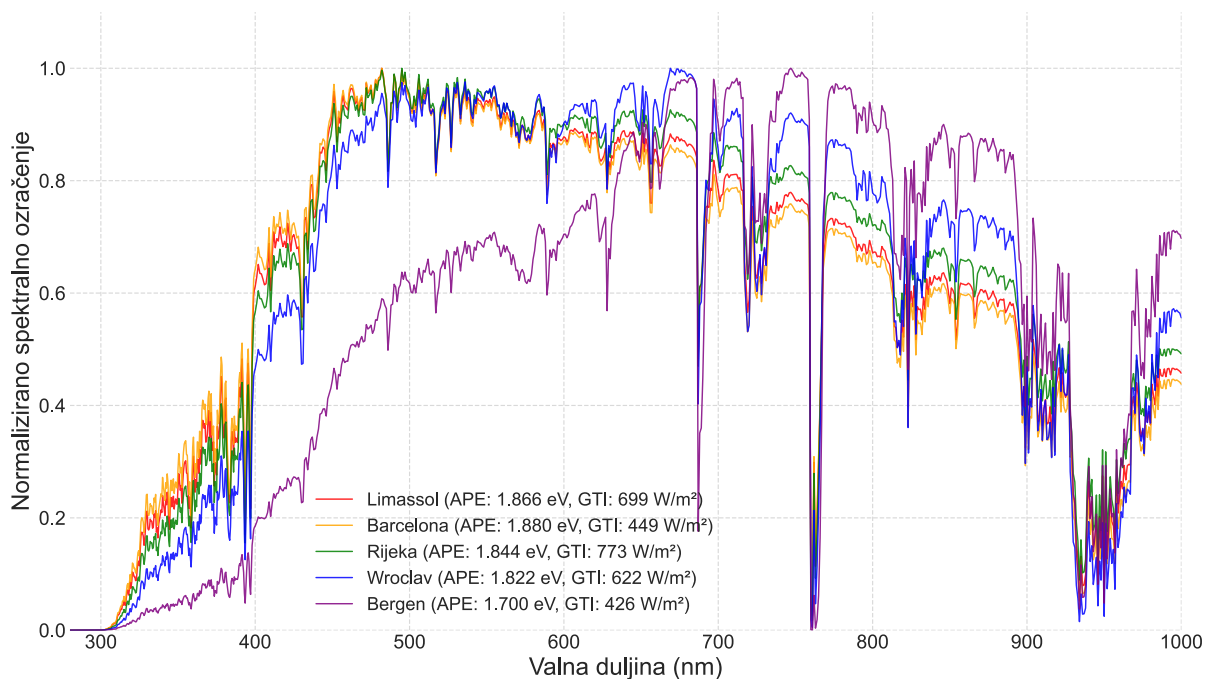
Slika 3.9 Mjesečne *APE* vrijednosti za pet promatranih lokacija.

tijekom godine i kako ih ponderiranje s ozračenjem otežava: ljeti, kada je *AM* ionako nizak i ozračenje visoko, vedri dani s većim energetske doprinosom dominiraju godišnjom energetske bilansom, pa oblačni dani, iako lokalno povisuju *APE*, imaju ograničen utjecaj na godišnji ponderirani *APE*. Zimi, pak, visoke *AM* vrijednosti i niska ukupna razina ozračenja znače da ni oblačni dani ne mogu značajno pomjeriti *APE* prema plavom dijelu spektra, pa se najniže vrijednosti pojavljuju upravo za vedre zimske dane.

Za dodatno pojašnjenje sezonskih razlika, na slikama 3.10 i 3.11 prikazana je usporedba pojedinačnih modeliranih spektara za svih pet lokacija za tipičan vedar ljetni dan i tipičan vedar zimski dan u podne, pri čemu su svi spektri normalizirani na vlastiti maksimum spektralnog ozračenja. Ovakva normalizacija uklanja utjecaj apsolutne razine ozračenja i naglašava isključivo razlike u obliku spektra. Ljeti se za svih pet lokacija uočava vrlo sličan kvalitativni oblik spektra, s gotovo identičnom raspodjelom energije u UV i vidljivom području te razlikama koje postaju značajnije tek u NIR dijelu spektra, gdje neke lokacije (npr. mediteranske) zadržavaju nešto viši relativni intenzitet u odnosu na sjevernije lokacije. Zimi je slika bitno drugačija: spektri pokazuju mnogo izraženije razlike po valnim duljinama, pri čemu sjevernije lokacije imaju relativno slabiji UV i vidljivi dio, ali izraženiji NIR rep, dok južnije lokacije zadržavaju viši relativni udio energije u vidljivom području. Takva redistribucija energije po valnim duljinama izravno se odražava na *APE* - lokacije s većim relativnim udjelom kratkovalnog zračenja (npr. južnije lokacije ljeti) imaju više *APE* vrijednosti, dok lokacije s izraženijim NIR repom (sjevernije lokacije zimi) pokazuju niže *APE*, u skladu s mjesečnim i godišnjim vrijednostima prikazanim na prethodnim slikama.



Slika 3.10 Spektar Sunčeva zračenja za tipičan ljetni vedar dan za pet promatranih lokacija.

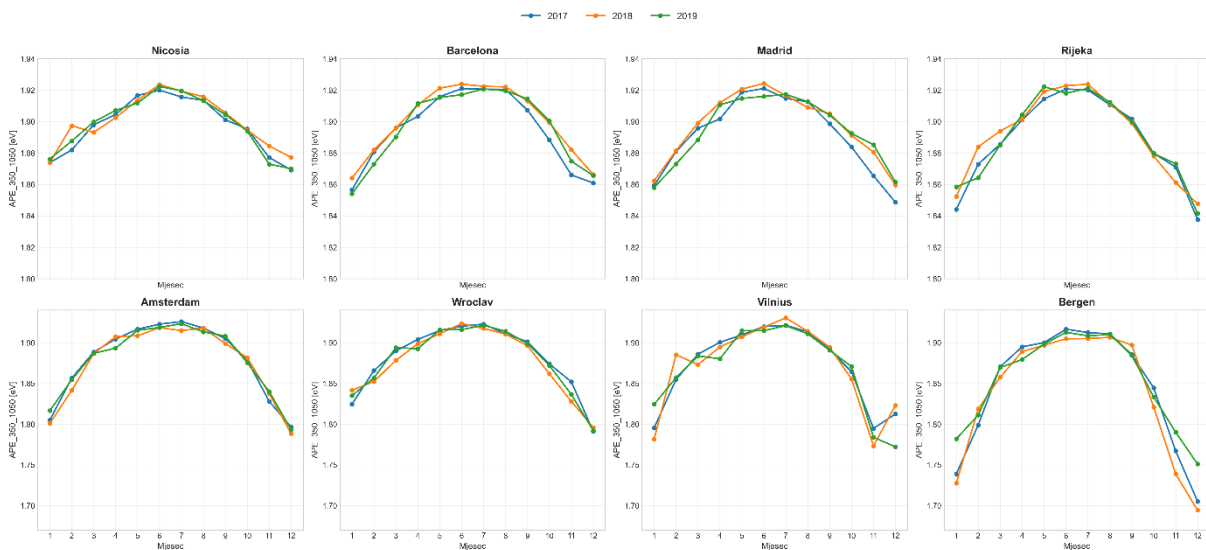


Slika 3.11 Spektar Sunčeva zračenja za tipičan zimski vedar dan za pet promatranih lokacija.

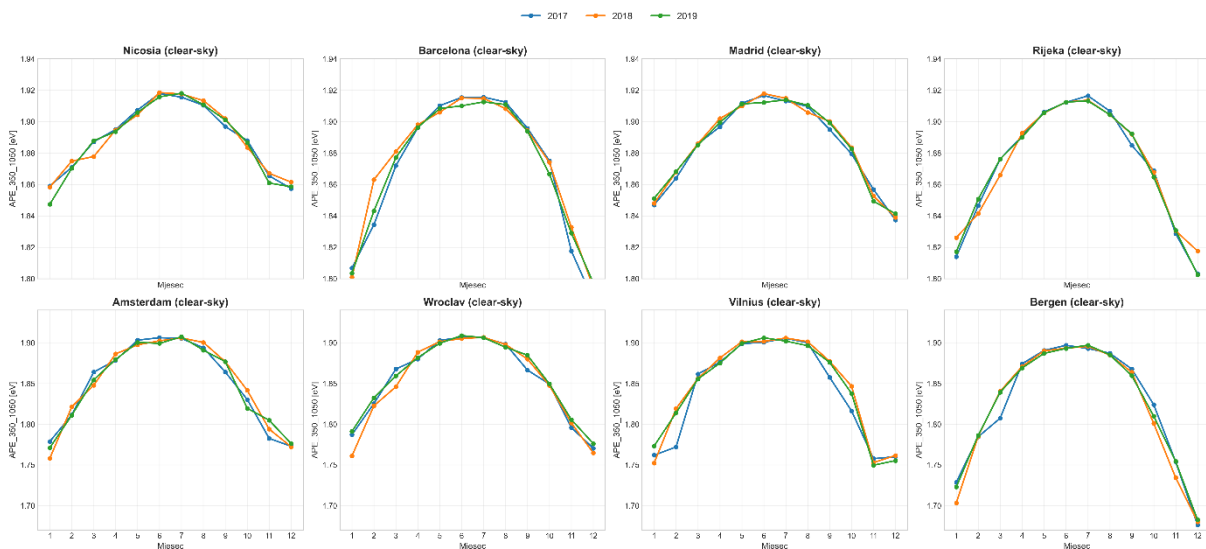
3.2.3. Vremenska analiza prosječne energije fotona

Vremenska varijabilnost prosječne energije fotona analizirana je na primjeru osam lokacija koje reprezentiraju različite europske klimatske tipove (suhe, mediteranske, oceanske i kontinentalne uvjete), i to za tri uzastopne godine (2017.-2019.). Za svaku lokaciju izračunate su ozračenjem ponderirane mjesečne i godišnje vrijednosti APE u rasponu 350-1050 nm te

koeficijent varijacije (engl. *coefficient of variation - CV*) na mjesečnoj skali, zasebno za oba atmosferska režima, čime se kvantificira koliko su međugodišnje promjene spektra varijabilne u odnosu na srednju intra-godišnju vrijednost. CV predstavlja relativnu mjeru raspršenosti koja se definira kao omjer standardne devijacije i aritmetičke sredine te pokazuje kolika je varijabilnost neke veličine u odnosu na njezinu prosječnu vrijednost. Mjesečne vrijednosti APE za sve tri godine za svih osam lokacija prikazane su na slici 3.14. za sve uvjete neba i na slici 3.15. za uvjete vedrog neba.



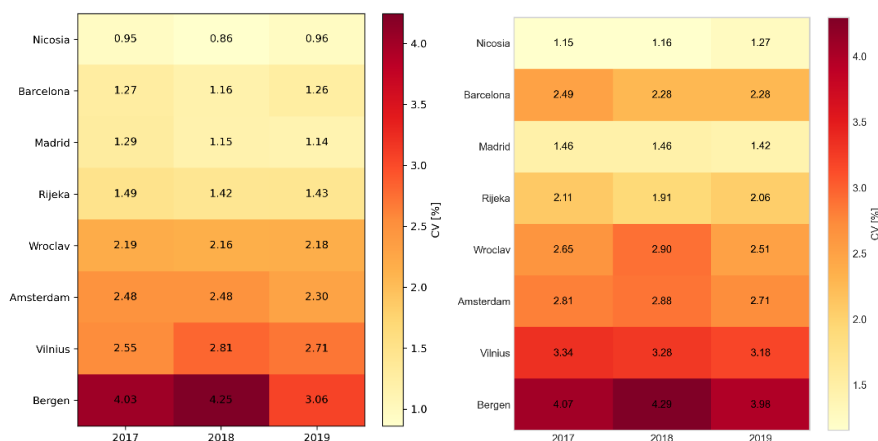
Slika 3.12 Mjesečne vrijednosti APE za osam lokacija za sve uvjete neba.



Slika 3.13 Mjesečne vrijednosti APE za osam lokacija za vedro nebo.

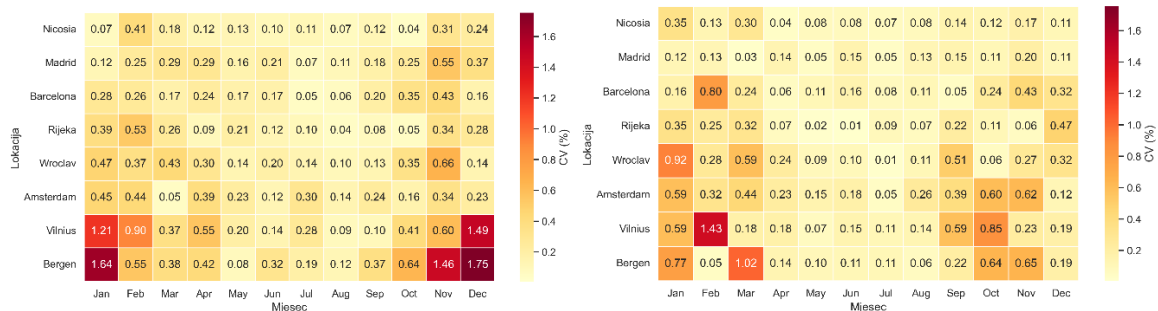
Toplinska mapa koeficijenta varijacije za sve uvjete neba prikazana na slici 3.14 (lijevo) pokazuje da su mediteranske lokacije (Nicosia, Barcelona, Madrid, Rijeka) vrlo stabilne, s CV vrijednostima u rasponu otprilike 0,9-1,5%, dok oceanske i sjevernije kontinentalne lokacije (Amsterdam, Wroclav, Vilnius, Bergen) pokazuju veće vrijednosti CV-a, reda 2-4%. Ovakav

obrazac odražava veću intra-godišnju dinamiku oblaka i atmosferskih uvjeta u oceanskoj i sjevernoj klimi. Za uvjete vedrog neba prikazanim na slici 3.15 (desno) CV raste na svim lokacijama (npr. Nicosia s oko 0,9-1,0% na ~1,15-1,27%, Barcelona s ~1,2% na ~2,3-2,5%, Bergen s ~4,0-4,3%), što je očekivano jer se promatra isključivo varijacija spektra u trenucima visokog ozračenja, bez „izravnavanja“ koje donose raspršeni, oblačni uvjeti.

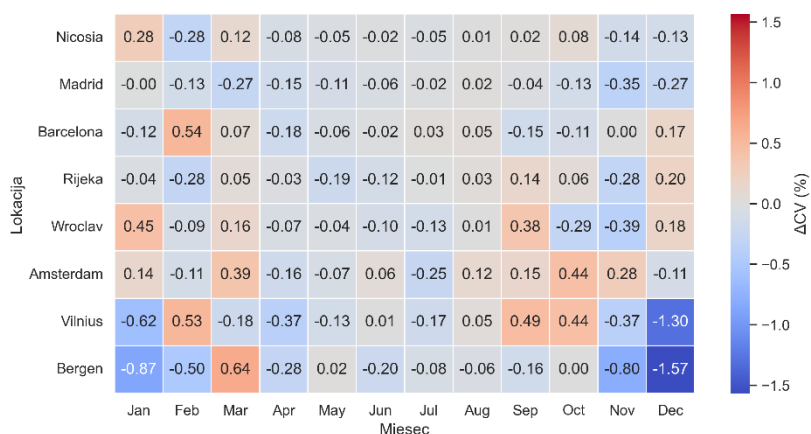


Slika 3.14 Toplinska mapa koeficijenta varijacije za sve uvjete neba (lijevo) i za uvjete vedrog neba (desno).

Za uvjete vedrog neba međugodišnji mjesečni APE profili pokazuju nižu varijabilnost na većini lokacija, osobito u mediteranskom i kontinentalnom pojasu što se vidi na toplinskoj mapi na slici 3.15: Nicosia i Madrid imaju vrlo male prosječne CV vrijednosti (~0,14% i ~0,11%) i umjerene maksimalne mjesečne iznose (do ~0,35% i ~0,20%), što potvrđuje da se sezonski profil spektra za vedro nebo između godina reproducira iznimno stabilno. Barcelona i Rijeka ostaju u rasponu srednjeg CV-a od oko 0,17-0,23%, s povremenim mjesecima s višim odstupanjima (maksimalno do ~0,80% u Barceloni i ~0,47% u Rijeci), vezanim uz pojedine godine s izraženijim epizodama aerosola ili vodene pare, dok u središnjoj i sjevernoj Europi CV za uvjete vedrog neba umjereno raste: Wroclav i Amsterdam bilježe srednje vrijednosti oko 0,29-0,33% (maksimumi do ~0,92% i ~0,62%), Vilnius doseže ~0,39% u prosjeku uz pojedine mjesece s CV-om većim od 1,4%, a u Bergenu je clear-sky interannual CV znatno niži nego all-sky (srednje ~0,34% naspram 0,66%, maksimum ~1,02% naspram 1,75%), što implicira da najveći dio međugodišnje nestabilnosti mjesečnog APE-a u oceanskim uvjetima dolazi upravo od promjena u raspršenoj komponenti, dok je spektralni potpis vedrih sati iz godine u godinu relativno ponovljiv. Za intra-godišnji CV pri vedrom nebu (slika 3.15, desno) opaža se porast CV-a na svim lokacijama (npr. Nicosia s oko 0,9-1,0% na ~1,15-1,27%, Barcelona s ~1,2% na ~2,3-2,5%, Bergen s ~4,0-4,3%), što je očekivano jer se promatra isključivo varijacija spektra u trenucima visokog ozračenja, bez „izravnavanja“ koje donose oblačni uvjeti.



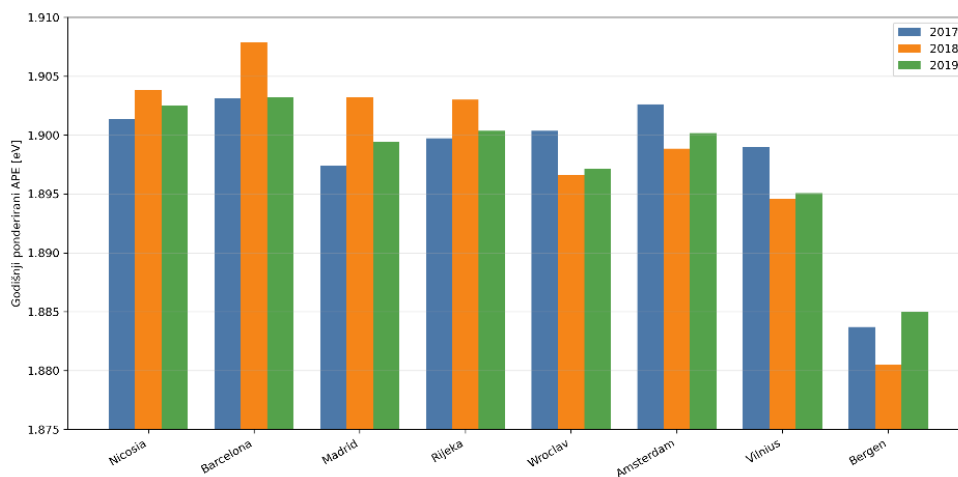
Slika 3.15 Višegodišnji mjesečni koeficijent varijacije APE-a za sve uvjete neba (lijevo) i vedro nebo (desno).



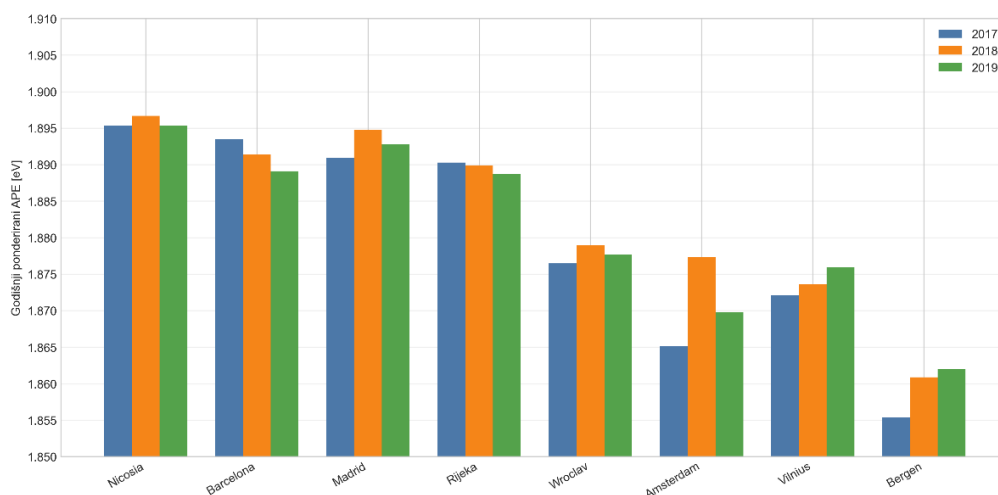
Slika 3.16 Razlika koeficijenta varijacije APE između vedrog i svih uvjeta neba.

Usporedba godišnjih APE vrijednosti na slikama 3.17 i 3.18 pokazuje da su apsolutni pomaci mali u eV, ali ipak fizički relevantni za FN tehnologije koje su osjetljivije na varijacije spektra. Na svim lokacijama godišnji APE za sve uvjete neba ostaje u uskom intervalu od približno 1,88-1,91 eV: mediteranske lokacije su blago „plavlje“ (Nicosia, Barcelona, Madrid, Rijeka \approx 1,897-1,904 eV), dok je oceansko-planinska lokacija Bergen nešto „crvenija“ (\approx 1,881-1,885 eV). Ipak, relativne međugodišnje promjene APE za sve uvjete neba (slika 3.16) dosežu lokalno do nekoliko desetinki posto: većina lokacija bilježi pomake reda 0,03-0,3% između dviju godina (npr. Madrid +0,31% 2017.-2018., Rijeka +0,17% 2017.-2018., Vilnius -0,23% 2017.-2018.), a kumulativne razlike u razdoblju 2017.-2019. uglavnom ostaju ispod \sim 0,2%. Iako su te promjene male na razini energetskeg centra spektra, za tankoslojne tehnologije one nisu zanemarive: već promjena APE-a od \sim 0,005 eV može rezultirati oko 1% razlike u spektralnom faktoru korekcije, dok kristalni silicij pokazuje nešto manji, ali i dalje značajan odziv. Za uvjete vedrog neba godišnje APE vrijednosti na svim lokacijama dodatno se pomiču prema crvenijem spektru, u rasponu približno 1,86-1,90 eV, što je u skladu s pojačanim crvenim pomacima pri većim masama zraka i odsustvu raspršene komponente zbog oblačnosti. Mediteranske lokacije

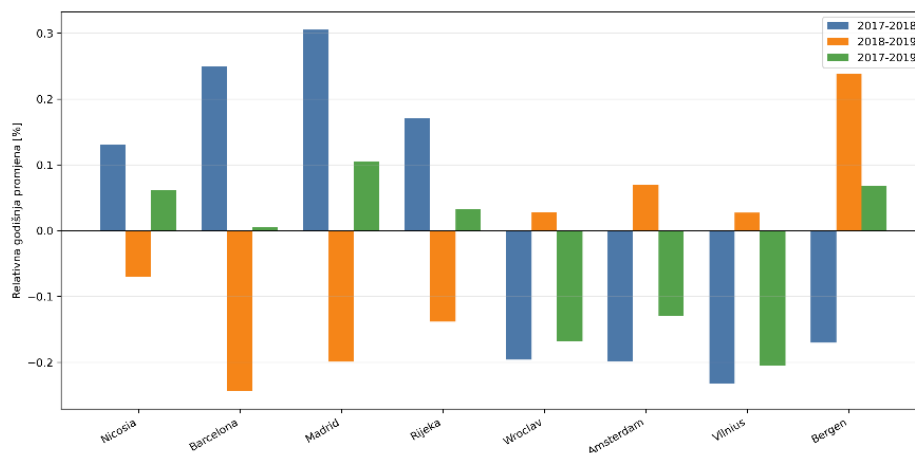
i dalje zadržavaju najviše APE vrijednosti (Nicosia, Barcelona, Madrid, Rijeka $\approx 1,889-1,897$ eV), dok Bergen ostaje na donjem kraju raspona ($\approx 1,855-1,862$ eV). Međugodišnje promjene APE-a (slike 3.19 za sve uvjete neba i 3.20 za vedro nebo) za uvjete vedrog neba nešto su izraženije nego za sve uvjete neba, pri čemu se relativne razlike između pojedinih godina kreću od približno $-0,23\%$ do oko $+0,65\%$, s najvećim skokom u Amsterdamu između 2017. i 2018. ($+0,65\%$), dok je na većini lokacija promjena i dalje unutar $\pm 0,2-0,3\%$. I u tom je slučaju tipična apsolutna promjena APE reda veličine nekoliko tisućinki eV, što je upravo raspon pri kojem tankoslojne tehnologije mogu pokazati promjene spektralnog efekta od oko 1% , a kristalni silicij nešto manje, ali i dalje dovoljno da bude relevantan pri procjeni dugoročne energetske proizvodnje i kalibraciji SF modela.



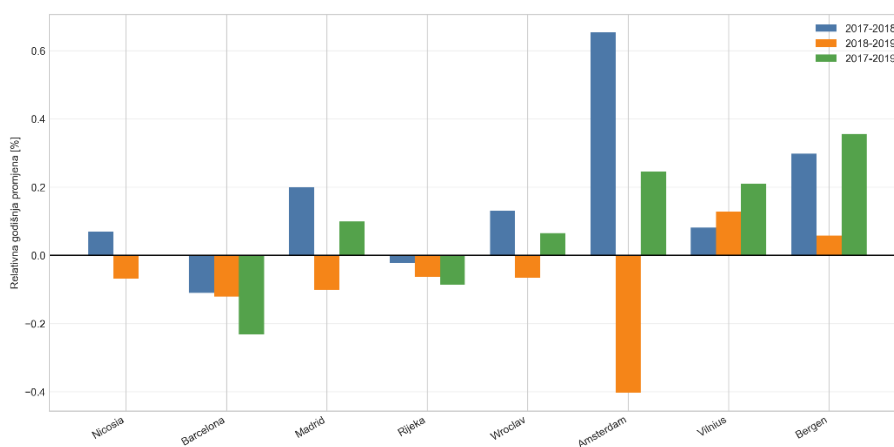
Slika 3.17 Godišnje APE vrijednosti za sve uvjete neba za svih osam promatranih lokacija.



Slika 3.18 Godišnje APE vrijednosti za vedro nebo za svih osam promatranih lokacija.



Slika 3.19 Međugodišnje varijacije APE-a za osam promatranih lokacija za sve uvjete neba.



Slika 3.20 Međugodišnje varijacije APE-a za osam promatranih lokacija za vedro nebo.

3.3. Analiza spektralne varijabilnosti europskih lokacija pomoću faktora spektralne korekcije

U prethodnim poglavljima analizirana je spektralna varijabilnost Sunčeva zračenja kroz parametar prosječne energije fotona (APE), koji pruža opću, tehnološki neovisnu karakterizaciju spektra. Međutim, kako bi se dobila izravnija i praktičnija procjena utjecaja spektra na stvarnu proizvodnju energije, u daljnjoj analizi uvodi se faktor specifičan za pojedinu FN tehnologiju, faktor spektralne korekcije (SF). U ovom poglavlju SF, izračunat za osam reprezentativnih FN tehnologija odabranih u poglavlju 3.2, služi kao osnovna varijabla za prostornu i vremensku analizu spektralnog utjecaja na proizvodnju energije.

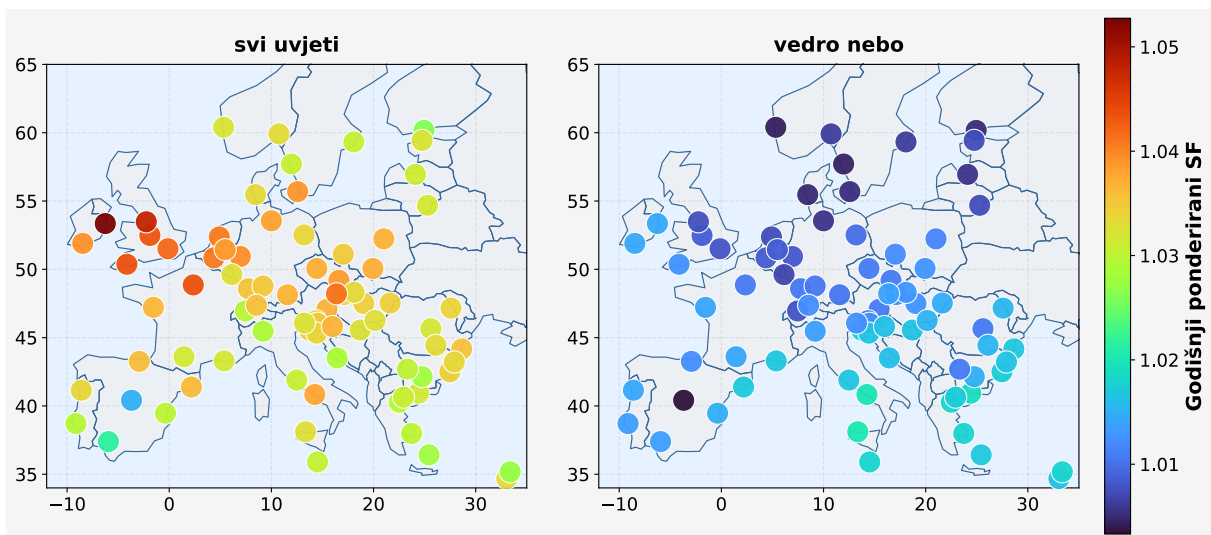
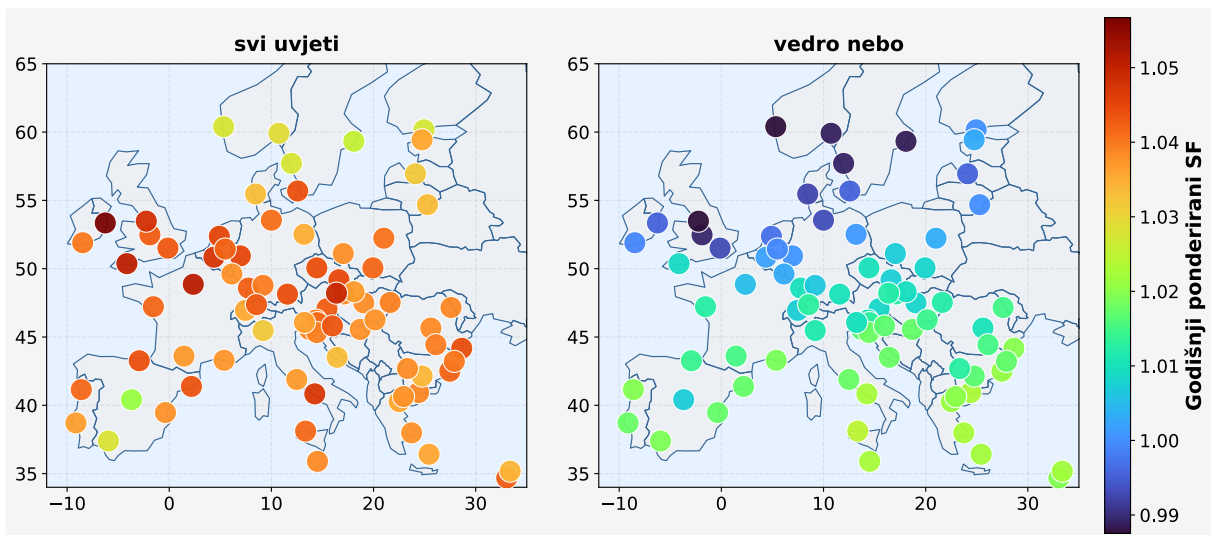
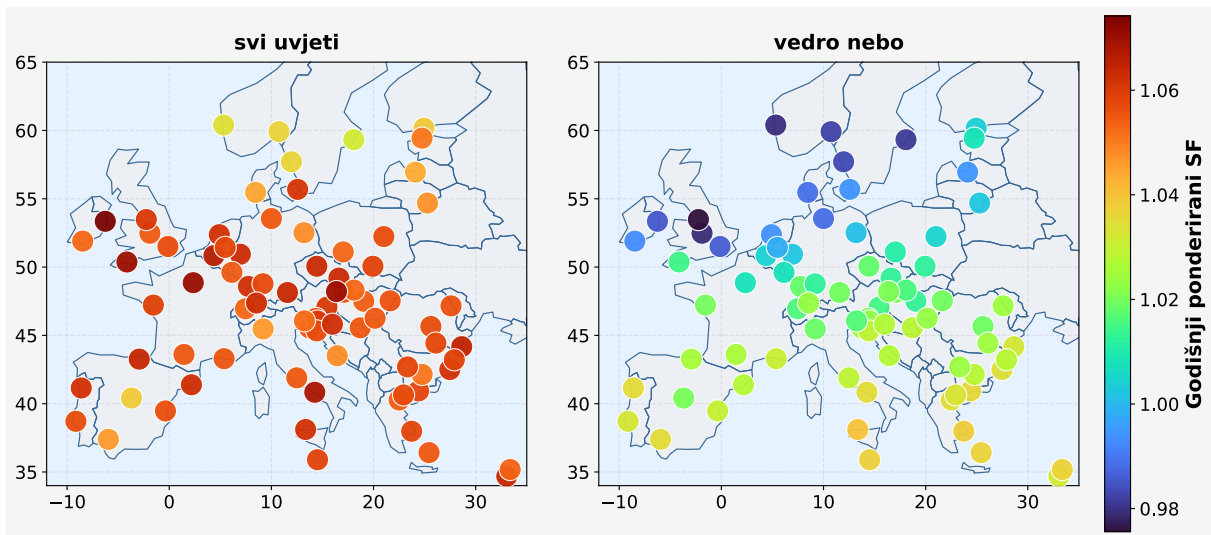
3.3.1. Prostorna raspodjela faktora spektralne korekcije na europskoj razini

Na slikama 3.21 i 3.22 prikazane su europske SF mape za sedam analiziranih FN tehnologija (PERT nije prikazan jer je gotovo identičan kao PERC), pri čemu svaka lokacija (od ukupno 79 analiziranih) prikazuje vrijednost godišnjeg ozračenjem ponderiranog SF-a:

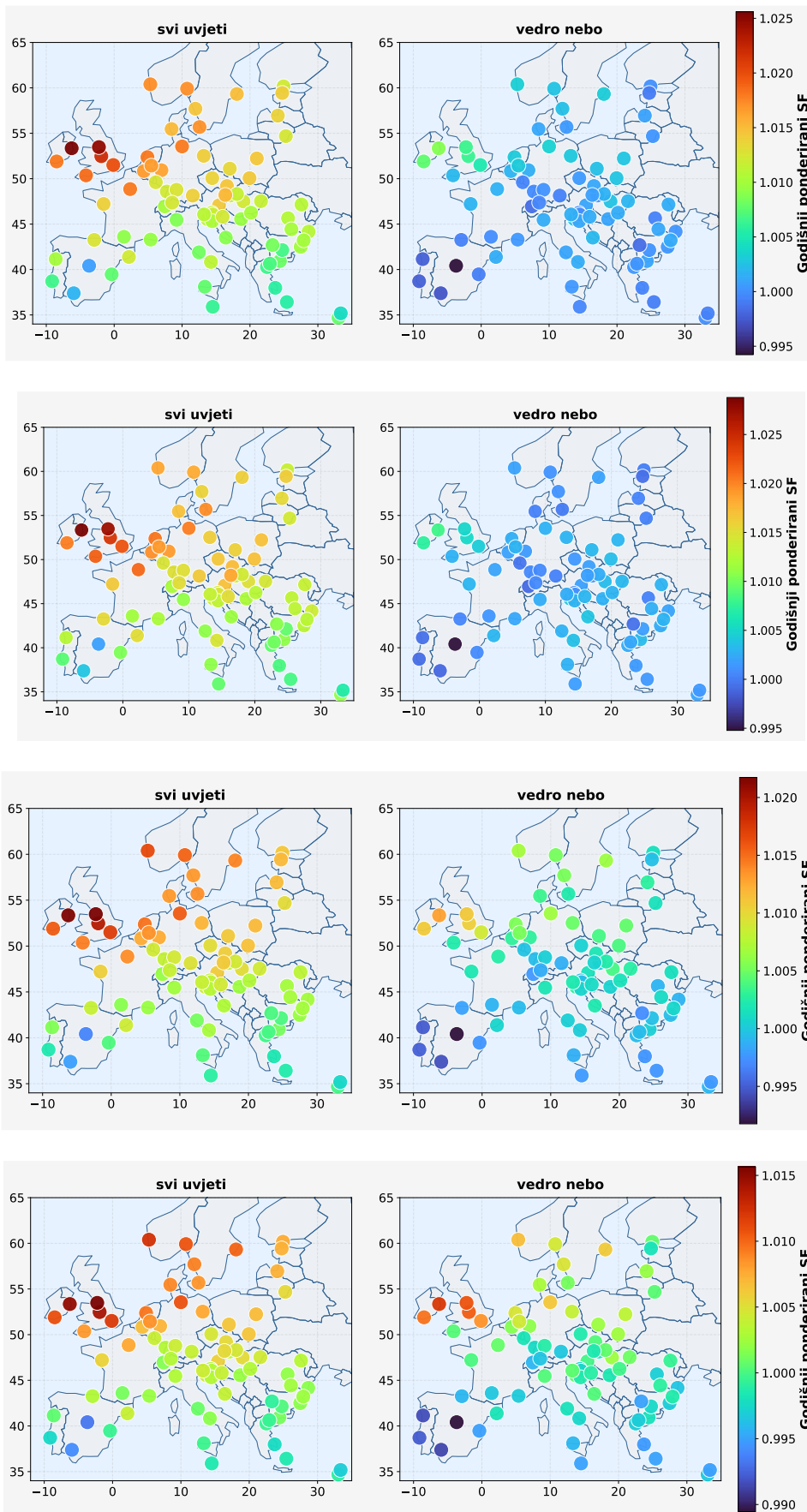
$$\overline{SF} = \frac{\sum_{i=1}^N G_i SF_i}{\sum_{i=1}^N G_i} \quad (3.13)$$

gdje je G ukupno ozračenje, a SF predstavlja faktor spektralne korekcije. Svaka slika prikazuje dvije mape: lijeva prikazuje satne SF vrijednosti za sve vremenske uvjete, a desna za uvjete vedrog neba. Primjena ozračenjem ponderiranih godišnjih SF vrijednosti umjesto jednostavnih vremenskih prosjeka osigurava da SF -u više doprinose sati s visokim ozračenjem, čime se dobiva realnija procjena spektralnog utjecaja na ukupni energetske prinos.

Za uvjete vedrog neba rezultati pokazuju jasnu prostornu raspodjelu SF -a vezanu uz geografsku širinu. Za kristalne silicijske tehnologije (PERC, PERT, HJT, poli-Si) raspon godišnjih vrijednosti za vedro nebo je izrazito uzak, primjerice, za PERC od 0,994 do 1,009, što potvrđuje da su ove tehnologije manje osjetljive na spektralne varijacije u uvjetima vedrog neba. Nasuprot tome, tankoslojne tehnologije sa širim zabranjenim pojasom pokazuju znatno veću prostornu varijabilnost: a-Si ima raspon od 0,976 do 1,040, a perovskit od 0,988 do 1,025. Ova razlika proizlazi iz činjenice da navedene tehnologije imaju uži spektralni odziv koncentriran u području kraćih valnih duljina, čime postaju osjetljivije na promjene u omjeru plavog i crvenog dijela spektra uzrokovane varijacijom mase zraka s geografskom širinom, ali i varijacijama taložne vodene pare i vrste i količine aerosola. Godišnje vrijednosti SF za sve lokacije dane su u Prilogu A. Za uvjete vedrog neba primjetan je i prostorni gradijent jug-sjever, ali s različitim znakom i intenzitetom ovisno o tehnologiji. Kod a-Si i perovskita, južnoeuropske lokacije nižih geografskih širina pokazuju najviše godišnje SF vrijednosti za vedro nebo, dok se prema srednjoj i sjevernoj Europi SF postupno smanjuje te prelazi u vrijednost niže od jedan, odnosno spektralne gubitke. Takav trend odražava činjenicu da mediteranske lokacije, sa Suncem većim dijelom godine na visokim elevacijama i nižim vrijednostima mase zraka, generiraju spektre s većim udjelom kratkovalnog zračenja u odnosu na referentni AM 1,5 spektar, što je izrazito povoljno za tehnologije s visokim zabranjenim pojasom poput a-Si i perovskita. Nasuprot tome, na višim geografskim širinama veće vrijednosti AM-a pomiču spektar prema duljim valnim duljinama i reduciraju raspoloživu plavu komponentu, pa je SF vedrog neba za te tehnologije bliži jediničnoj vrijednosti ili nešto niži. CdTe pokazuje sličan, ali umjereniji trend rasta SF -a od sjevera prema jugu, pri čemu su uočljiva lokalna odstupanja koja proizlaze iz njegove pojačane osjetljivosti na taložnu vodenu paru - na lokacijama s visokim W spektar je jače prigušen u infracrvenom području, što dodatno modificira spektralne dobitke u odnosu na čisti AM efekt (toplinska mapa mjesečnih vrijednosti W za sve lokacije dana je u Prilogu A). Kristalne silicijske tehnologije (PERC, PERT, HJT, poli-Si) te CZTSSe pokazuju suprotnu



Slika 3.21 Mapa Europe s SF vrijednostima za *a-Si* (gore), perovskit (sredina) i CdTe (dolje) za sve uvjete neba (lijevo) i vedro nebo (desno).



Slika 3.22 Mapa Europe s SF vrijednostima za PERC, poli-Si, HJT i CZTSSe (s vrha prema dolje) za sve uvjete neba (lijevo) i vedro nebo (desno).

tendenciju, s nešto povoljnijim SF vrijednostima vedrog neba na višim geografskim širinama i manjim razlikama između sjevera i juga, čime potvrđuju svoju manju ukupnu spektralnu osjetljivost u odnosu na tankoslojne tehnologije.

Usporedba mapa otkriva da oblačnost sustavno podiže SF vrijednosti za sve analizirane tehnologije i na svim lokacijama. Ova pojava ima jasno fizikalno objašnjenje - oblaci selektivno raspršuju i apsorbiraju Sunčevo zračenje, pri čemu više propuštaju kratkovalne (plave) komponente, a više prigušuju duže valne duljine spektra. Rezultirajući spektar pod oblačnim uvjetima stoga je pomaknut prema kraćim valnim duljinama (veća APE), što za većinu FN tehnologija predstavlja spektralni dobitak ($SF > 1$). Ovaj učinak posebno je izražen za tankoslojne tehnologije s visokim zabranjenim pojasom. Za a-Si, SF vrijednosti za sve uvjete neba kreću se od 1,032 do 1,074, dok su vrijednosti vedrog neba u rasponu od 0,976 do 1,040 - razlika prosječnih vrijednosti iznosi oko 4% (srednja vrijednost 1,056 naspram 1,016). Slično, za perovskit raspon za sve uvjete neba (1,021 do 1,057) znatno premašuje raspon za vedro nebo (0,988 do 1,025), s razlikom prosjeka od oko 3%. Za kristalne silicijske tehnologije razlika je manja, ali i dalje prisutna: PERC prelazi s prosječnih 1,001 (vedro nebo) na 1,012 (svi uvjeti neba), što predstavlja pomak od oko 1,1 postotnog boda.

Prostorna distribucija razlike ΔSF za sve uvjete neba i vedrog neba nije uniformna po Europi. Sjevernoeuropske lokacije s većom oblačnošću (npr. Dublin, Stockholm, London) pokazuju veće ΔSF vrijednosti nego mediteranske lokacije (npr. Madrid, Atena) koje imaju manji broj oblačnih sati godišnje. To je izravna posljedica činjenice da se na lokacijama s visokom oblačnošću veći udio godišnjeg ozračenja prima pod oblačnim uvjetima, čime se taj ponderirani SF više razlikuje od vrijednosti pod vedrim nebom. Dakle, u sjevernoeuropskim regijama, modeli koji zanemaruju spektralne efekte ili ih procjenjuju samo za vedro nebo mogu značajno podcijeniti stvarni energetske prinos tankoslojnih FN modula.

Na slikama 3.23 i 3.24 prikazani su kutijasti (engl. *box and whisker plot*) dijagrami godišnjih SF vrijednosti za svih 79 lokacija, zasebno za sve uvjete neba (plava boja) i vedro nebo (narančasta boja). Tehnologije su podijeljene u dvije grupe: prva skupina na slici 3.23 obuhvaća tehnologije s izraženijim spektralnim odzivom - a-Si, CdTe i perovskit, dok druga skupina na slici 3.24 uključuje kristalne silicijske tehnologije i CZTSSe - PERC, HJT, poli-Si, PERT i CZTSSe.

Na temelju ovih dijagrama mogu se izvući sljedeći zaključci:

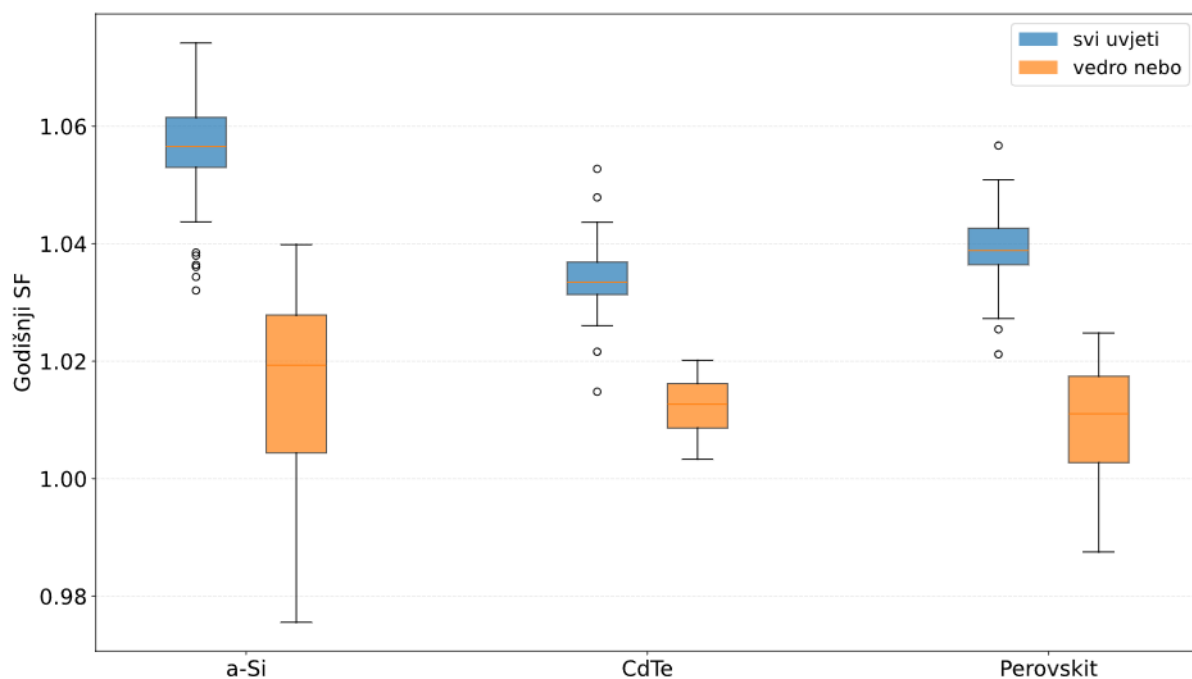
1. Rang spektralne osjetljivosti. Tehnologije se prema rasponu i medijanu SF vrijednosti mogu rangirati od najosjetljivije do najmanje osjetljive. Za sve uvjete neba, redoslijed prema ukupnom rasponu SF (razlika između maksimalne i minimalne vrijednosti preko svih 79 lokacija) glasi: a-Si (raspon 4,2 %) > CdTe (3,8 %) > perovskit (3,6 %) > poli-Si (2,7 %) > PERC (2,6 %) > PERT (2,5 %) > HJT (2,5 %) > CZTSSe (2,3 %). Ovaj redoslijed izravno korelira sa širinom zabranjenog pojasa i oblikom spektralnog odziva analiziranih tehnologija. Amorfni silicij s najužim i najviše pomaknutim spektralnim odzivom prema kraćim valnim duljinama pokazuje i najveću spektralnu osjetljivost.

2. Suženje raspona pod vedrim nebom. Za sve tehnologije, box-plotovi vedrog neba su znatno uži od onih za sve uvjete neba, što potvrđuje da oblačnost uvodi dodatnu spektralnu varijabilnost. Posebno je uočljivo da se za kristalne silicijske tehnologije SF vrijednosti vedrog neba grupiraju u izrazito uskom rasponu oko 1,00, s interkvartilnim rasponom (mjera raspršenosti podataka definirana kao razlika između trećeg kvartila (Q3) i prvog kvartila (Q1)) od samo 0,002-0,003, čime se potvrđuje da za ove tehnologije spektar pod vedrim nebom ima minimalan utjecaj na godišnji energetske prinos.

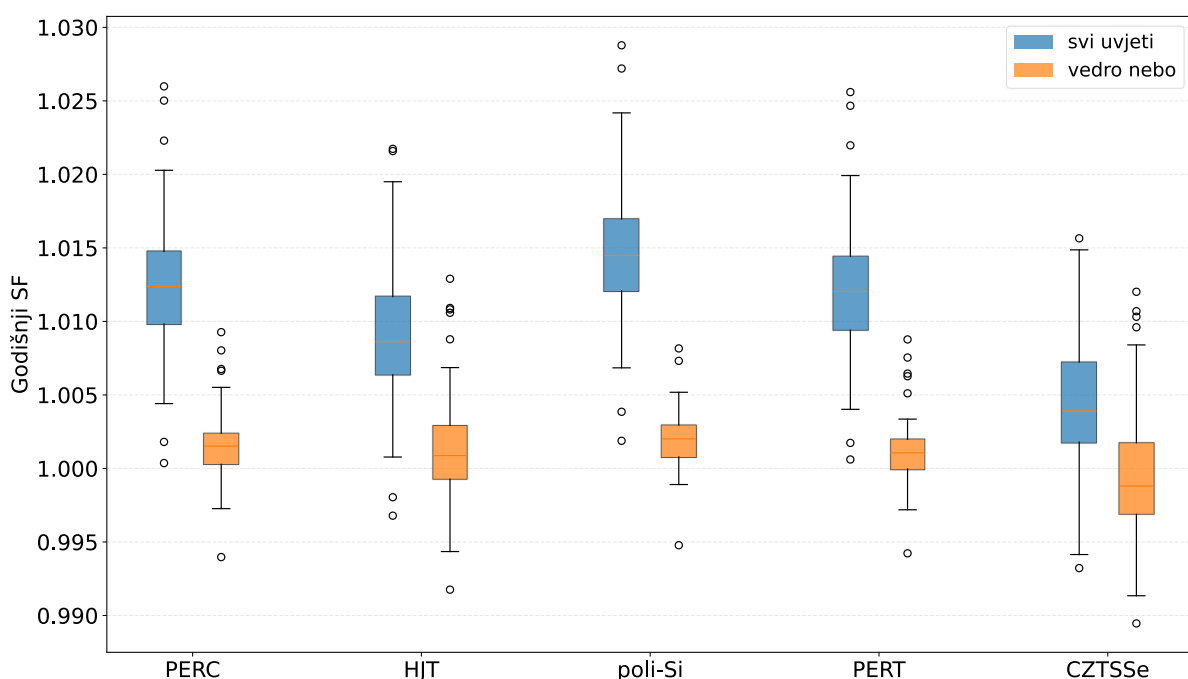
3. Asimetrija distribucija. Primjetna je pozitivna asimetrija distribucija za sve uvjete neba, posebno za a-Si i perovskit, što ukazuje na to da postoji podskup lokacija s iznadprosječno visokim SF vrijednostima. Te lokacije odgovaraju sjevernoeuropskim lokacijama s visokom oblačnošću, gdje pomak spektra prema kratkim valnim duljinama pod oblačnim uvjetima dodatno pojačava spektralni dobitak za navedene tehnologije.

4. Vrijedi istaknuti da CZTSSe i Panasonic HJT predstavljaju jedine analizirane tehnologije koje pod svim uvjetima neba na pojedinim lokacijama pokazuju $SF < 1$ (minimalne vrijednosti oko 0,993). To je u skladu s njihovim relativno širokim spektralnim odzivom koji se proteže dublje u bliski infracrveni dio spektra nego kod ostalih tankoslojnih tehnologija. Pomak spektra prema plavom dijelu pod oblačnim uvjetima za ove tehnologije ne predstavlja dobitak, jer se smanjuje udio spektralne gustoće zračenja u valnom području u kojem su im moduli najosjetljiviji, što se odražava u povremenim SF vrijednostima manjima od 1.

U Prilogu A u tablici A.3 sumirane su ključne statistike godišnjih SF vrijednosti za sve analizirane tehnologije za oba uvjeta. Ovi rezultati ujedno čine osnovu za daljnju analizu u narednim poglavljima - povezanost SF i APE vrijednosti, vremensku dinamiku SF vrijednosti, te klasteriranje lokacija.



Slika 3.23 Raspodjela godišnje SF vrijednosti za a-Si, CdTe i Perovskit (svi uvjeti neba - plava boja, vedro nebo - narančasta boja).



Slika 3.24 Raspodjela godišnje SF vrijednosti za PERC, poli-Si, HJT i CZTSSe (svi uvjeti neba - plava boja, vedro nebo - narančasta boja).

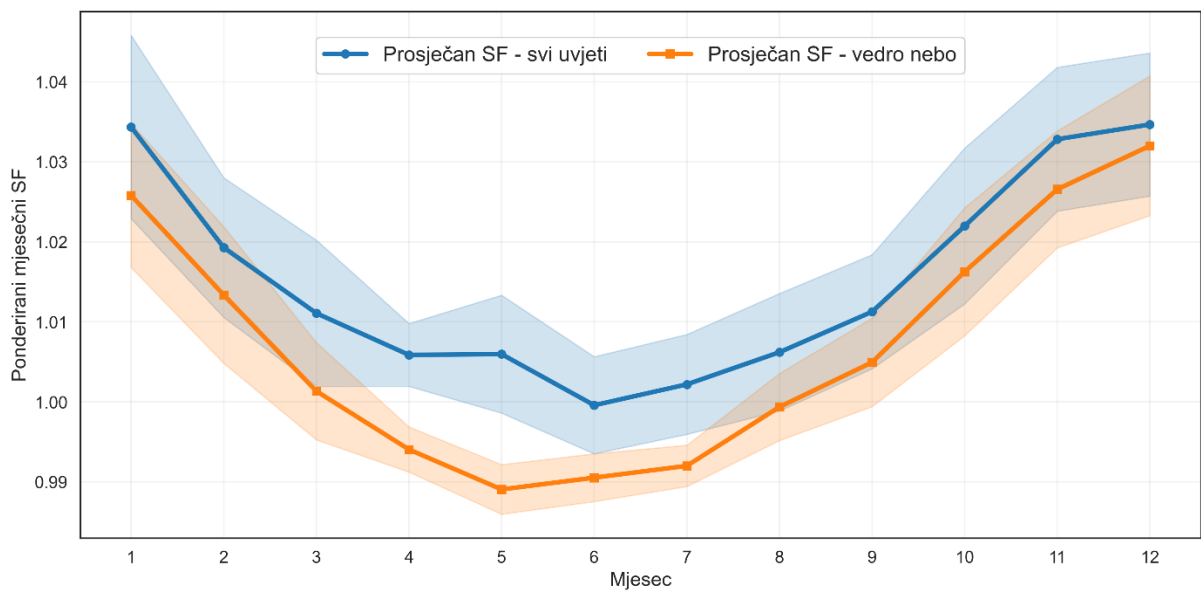
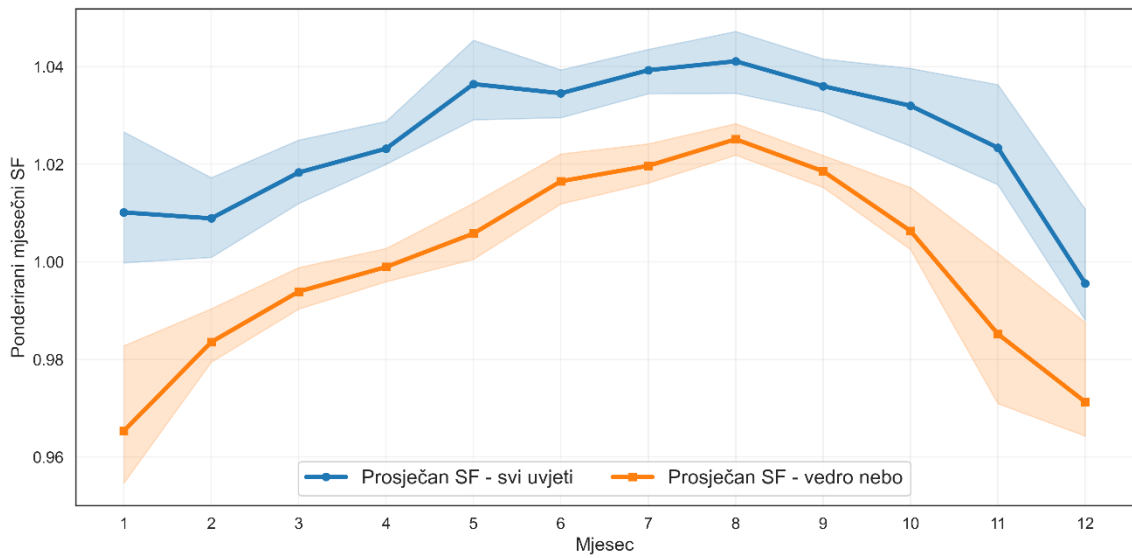
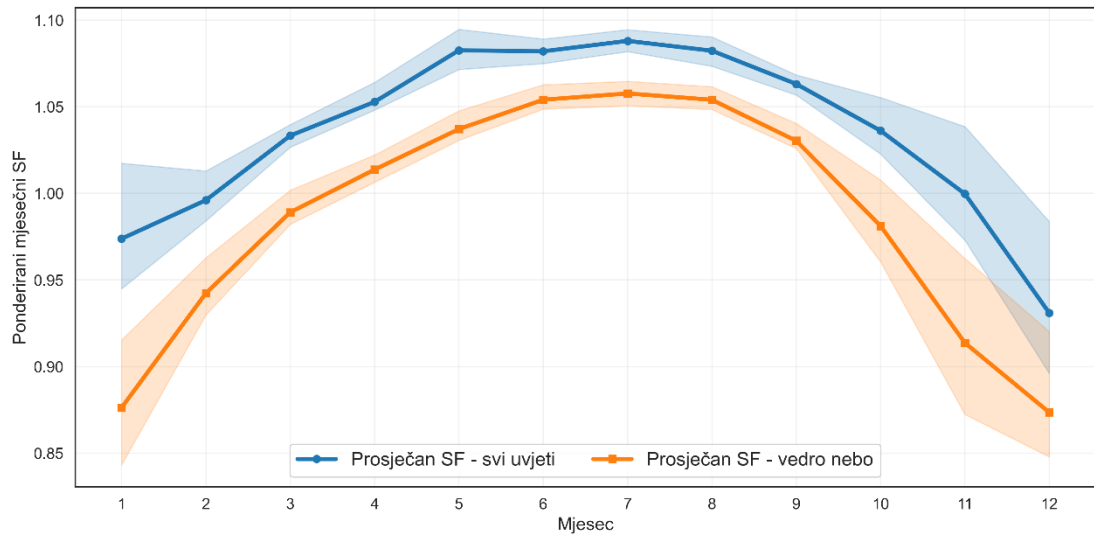
Za sustavno vrednovanje ozračenjem ponderiranih mjesečnih varijacija faktora spektralne korekcije među različitim FN tehnologijama odabrani su reprezentativni primjeri koji obuhvaćaju ključne značajke spektralnog odziva i tipične sezonske obrasce. Kao glavne

tehnologije za grafički prikaz odabrani su a-Si, CdTe i mono-Si HJT prikazani na slici 3.25, dok su rezultati za preostale tehnologije prikazani u Prilogu A i u tekstu se referiraju samo kroz sažete usporedbe.

U svakom mjesecu prikazana je srednja SF vrijednost kao kontinuirana linija, dok zasjenjeno područje između 25. i 75. percentila opisuje međukvartilni raspon SF raspodjele svih lokacija. Na taj način istodobno se kvantificiraju sezonski trend (srednja linija) i prostorna varijabilnost (raspršenost među lokacijama) za oba atmosferska režima.

Rezultati pokazuju jasan razlaz sezonskog ponašanja SF vrijednosti između tankoslojnih tehnologija i kristalnog silicija. Za a-Si i CdTe najmanje SF vrijednosti sustavno se javljaju u kasnoj jeseni i zimi, nakon čega SF raste kroz proljeće, dostiže maksimum tijekom ljeta, te se ponovno smanjuje prema jeseni. Ovaj obrazac osobito je izražen u režimu vedrog neba, gdje je sezonska dinamika mase zraka najčišće vidljiva, dok u režimu svih uvjeta neba oblačnost djelomično ublažava amplitude, ali ne mijenja osnovni trend. Fizikalno, riječ je o očekivanom odzivu tankoslojnih tehnologija čiji je spektralni odziv koncentriran u UV i vidljivom području: porast mase zraka u jesensko-zimskom razdoblju pomiče spektar prema crvenom, čime se značajan dio zračenja premješta izvan optimalnog područja odziva, pa SF opada.

Kod kristalnih silicijskih tehnologija, kao i kod CZTSSe, opaža se suprotan sezonski obrazac u odnosu na a-Si, CdTe i perovskite: najveće mjesečne SF vrijednosti javljaju se u kasnoj jeseni i zimi, dok su tijekom ljeta najmanje. Ovaj trend prisutan je i za sve uvjete neba i za vedro nebo, iako su amplitude u režimu vedrog neba čišće izražene. Takvo ponašanje odražava činjenicu da kristalni silicij i CZTSSe učinkovito koriste crveni i NIR dio spektra, pa zimski pomak spektra prema većim valnim duljinama (visok AM) relativno povećava njihov SF , dok ljeti, kada je spektar „plavlji“, tankoslojne tehnologije profitiraju, a SF tehnologija baziranih na kristalnom siliciju i CZTSSe se smanjuje.



Slika 3.25 Mjesečne SF vrijednosti za a-Si (gore), CdTe (sredina) i mono-Si HJT (dolje).

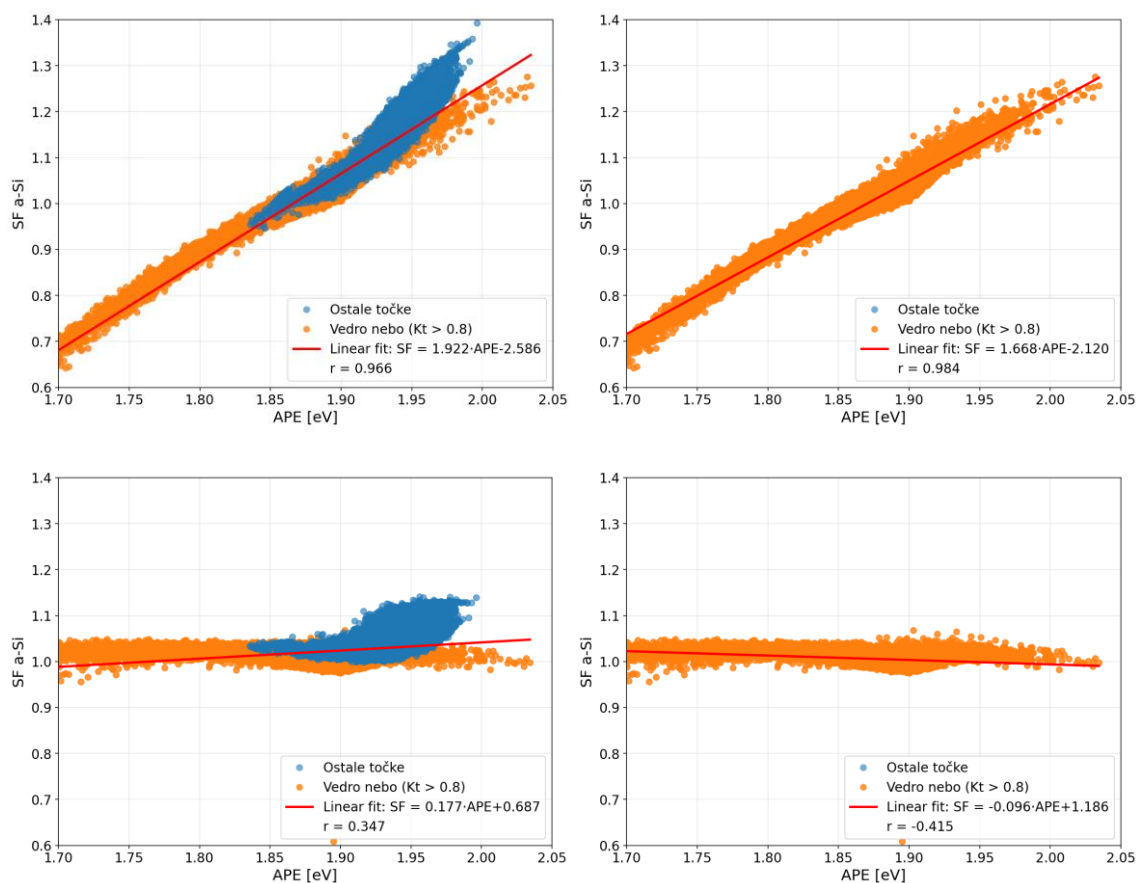
3.3.2. Veza između faktora spektralne korekcije i prosječne energije fotona

U poglavlju 3.2 analizirana je prostorna i vremenska varijabilnost spektra Sunčeva zračenja na europskoj razini pri čemu se *APE* pokazao kao iznimno korisna veličina za karakterizaciju cjelokupnog spektra jednim brojem. Prirodan je stoga sljedeći korak ispitivanje može li *APE* izravno i jednoznačno kvantificirati utjecaj spektra na rad različitih FN tehnologija. U ovom poglavlju prikazan je odnos između trenutnih, mjesečnih i godišnjih *SF* i *APE* vrijednosti te razmatrana potencijalna ograničenja bijektivnosti ovog indeksa, koja su teorijski opisana u drugom poglavlju.

Na slici 3.26 prikazan je odnos trenutnih *SF* i *APE* vrijednosti za amorfnu silicij (a-Si) i mono-Si PERC kao reprezentativne primjere tehnologije s uskim i širokim spektralnim odzivom. Raspored točaka u oba slučaja pokazuje karakteristično razdvajanje u dva suprotno orijentirana trenda. Ovaj oblik nastaje zbog kolizije dvaju fizikalno različitih scenarija koji rezultiraju sličnim visokim *APE* vrijednostima: vedro nebo s iznimno niskom masom zraka ($AM < 1,2$), pri čemu je spektar pomaknut prema kraćim valnim duljinama i nadilazi referentni spektar u plavom dijelu, te izrazito oblačni uvjeti koji selektivnom apsorpcijom i raspršenjem u NIR dijelu relativno pojačavaju kratkovalni dio spektra, kako je objašnjeno u poglavlju 2.1. Oba scenarija vode prema visokim *APE* vrijednostima, ali uz bitno različite *SF* vrijednosti, čime se bijektivnost odnosa *APE-SF* narušava upravo u gornjem dijelu rasporeda ($APE > 1,90$ eV).

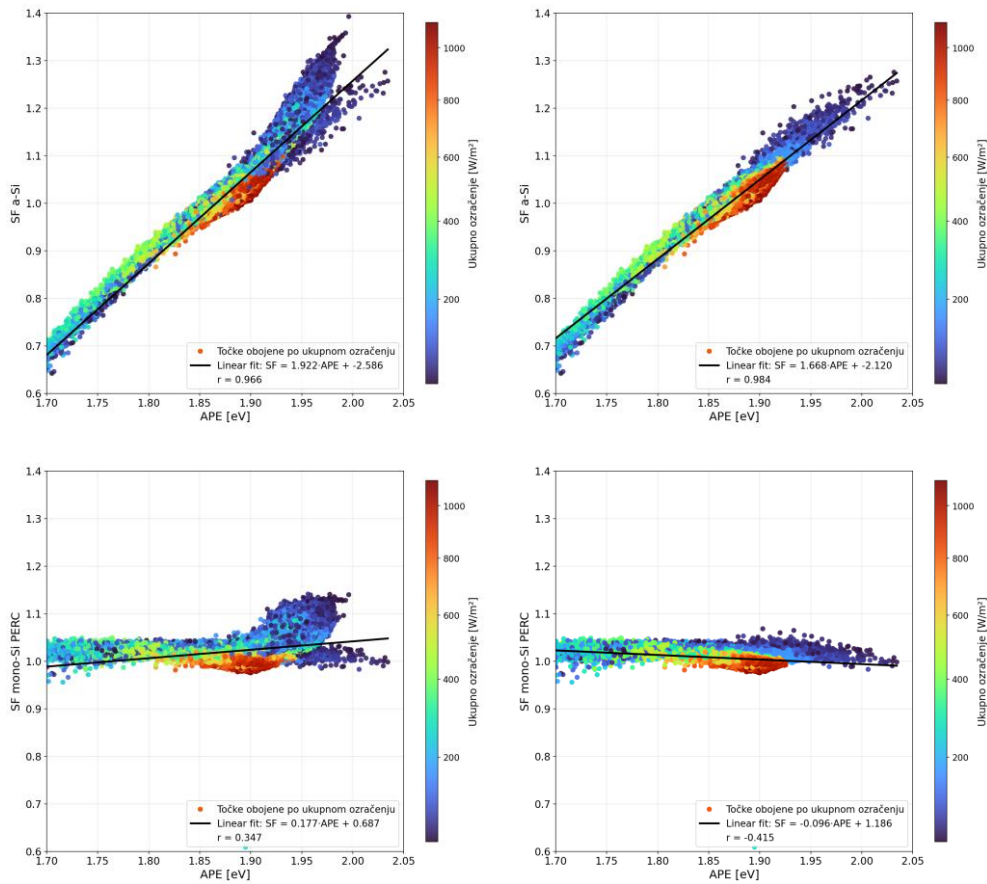
Kada se analiza ograniči isključivo na uvjete vedrog neba, razdvajanje u dva suprotna trenda nestaje, a raspored *SF-APE* postaje znatno pravilniji i monoton. To potvrđuje da je navedena nejednoznačnost posljedica miješanja dvaju atmosferskih režima, a ne inherentnog ograničenja samog *APE* indeksa unutar jednog režima. Ova opservacija u skladu je s nalazima Daxinija i suradnika, koji su nakon razvoja modela spektralne korekcije temeljenog isključivo na *APE* utvrdili potrebu za uvođenjem dodatne varijable kako bi se postigla bijektivnost i poboljšala točnost modela u uvjetima nižeg ozračenja [65].

Analiza nadalje pokazuje da je opisana pojava dva suprotna trenda najmanje izražena kod a-Si i perovskitnih tehnologija jer kod njih oba dijela kliješta uzrokuju rast *SF* vrijednosti, dok je najizraženija kod kristalnih silicijevih i tehnologija s proširenim NIR odzivom jer za oblačne uvjete uzrokuju rast, a za vedre pad *SF*-a. Ovaj nalaz izravno potvrđuje zaključke Nofuentesesa i suradnika, prema kojima je *APE* najrelevantniji za karakterizaciju spektra u rasponu valnih duljina od 400 do 900 nm [112]. Upravo u tom rasponu valnih duljina smješteni su spektralni odzivi a-Si i perovskitnih modula, što im osigurava veću korelaciju *SF-APE* i manji utjecaj navedenih rubnih scenarija.



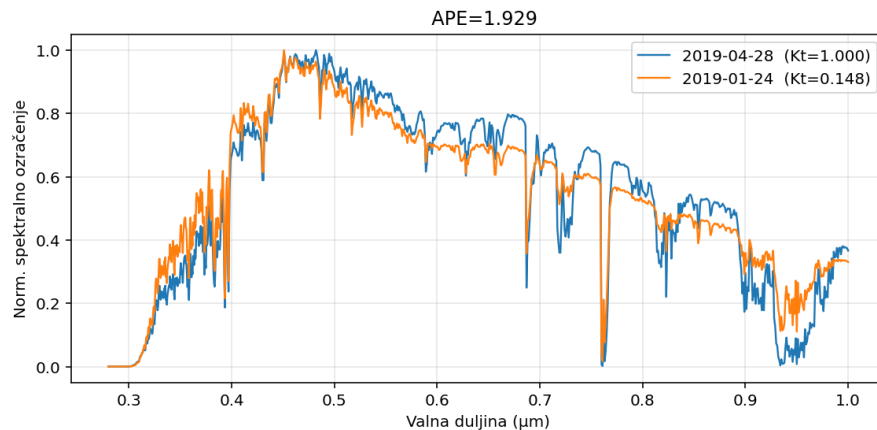
Slika 3.26 Odnos satnih vrijednosti SF i APE za $a-Si$ () i mono-Si PERC.

Na slici 3.27 prikazan je odnos satnih vrijednosti SF -a i APE -a za $a-Si$ i mono-Si PERC, pri čemu je boja svake točke proporcionalna ukupnom ozračenju. Jasno se vidi da vedri trenuci s ozračenjem iznad približno 300 W/m^2 formiraju gotovo savršeno linearan, jednodijelni odnos SF - APE , bez ikakvih izraženih anomalija u rasporedu točaka. Nasuprot tome, karakterističan oblik suprotnih trendova pojavljuje se isključivo u području niskih ozračenja, uglavnom ispod 200 W/m^2 : donji odgovara vedrim trenucima s vrlo niskim ozračenjem (npr. upravo nakon izlaska ili neposredno prije zalaska Sunca), dok gornji krak nastaje za izrazito oblačne trenutke, kada je ukupno ozračenje također nisko, ali je spektar snažno pomaknut prema plavom dijelu zbog dominacije raspršene komponente. Drugim riječima, bijektivnost APE indeksa narušena je upravo u rubnim uvjetima - kombinaciji visokih APE vrijednosti i niske vrijednosti ozračenja - u kojima se miješaju fizikalno različiti spektri (oblačno vs. vedro pri velikom AM -u) s vrlo sličnim APE -om. Kako bi se ta nejednoznačnost dodatno ilustrirala, na slici 3.28 prikazana su dva spektra za lokaciju Barcelona koji imaju identičnu APE vrijednost, ali bitno različite vrijednosti indeksa vedrine neba ($K_t = 1$ i $K_t = 0,1$). Iako je riječ o istoj prosječnoj energiji fotona, oblačni spektar s niskom K_t vrijednosti kvalitativno dominira kratkovalnim dijelom i



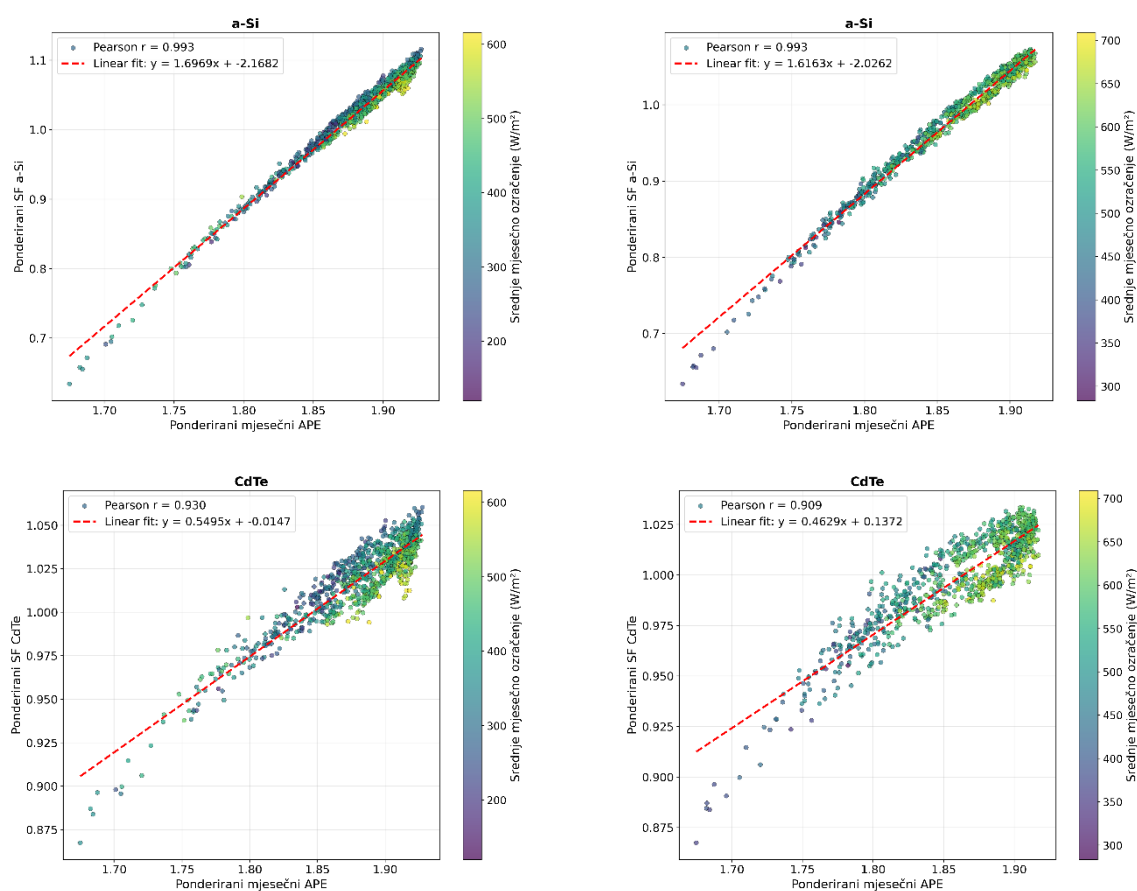
Slika 3.27 Odnos trenutnih vrijednosti SF-a i APE-a za a-Si i mono-Si PERC s koloriranjem prema ukupnom ozračenju.

ima uočljivo drugačiju raspodjelu energije po valnim duljinama od vedrog spektra. Time se jasno pokazuje da jedan broj (*APE*) nije dovoljan za potpuno razlikovanje spektralnih stanja koja se javljaju u različitim kombinacijama neba i geometrije, što motivira uvođenje dodatnih nezavisnih veličina. U nastavku, u poglavlju 3.3.3, ovaj je problem detaljnije analiziran korištenjem upravo indeksa vedrine neba kao dodatnog spektralnog indikatora koji vrlo učinkovito kvantificira stupanj naoblake i dopunjuje *APE* u opisu spektralnih promjena.

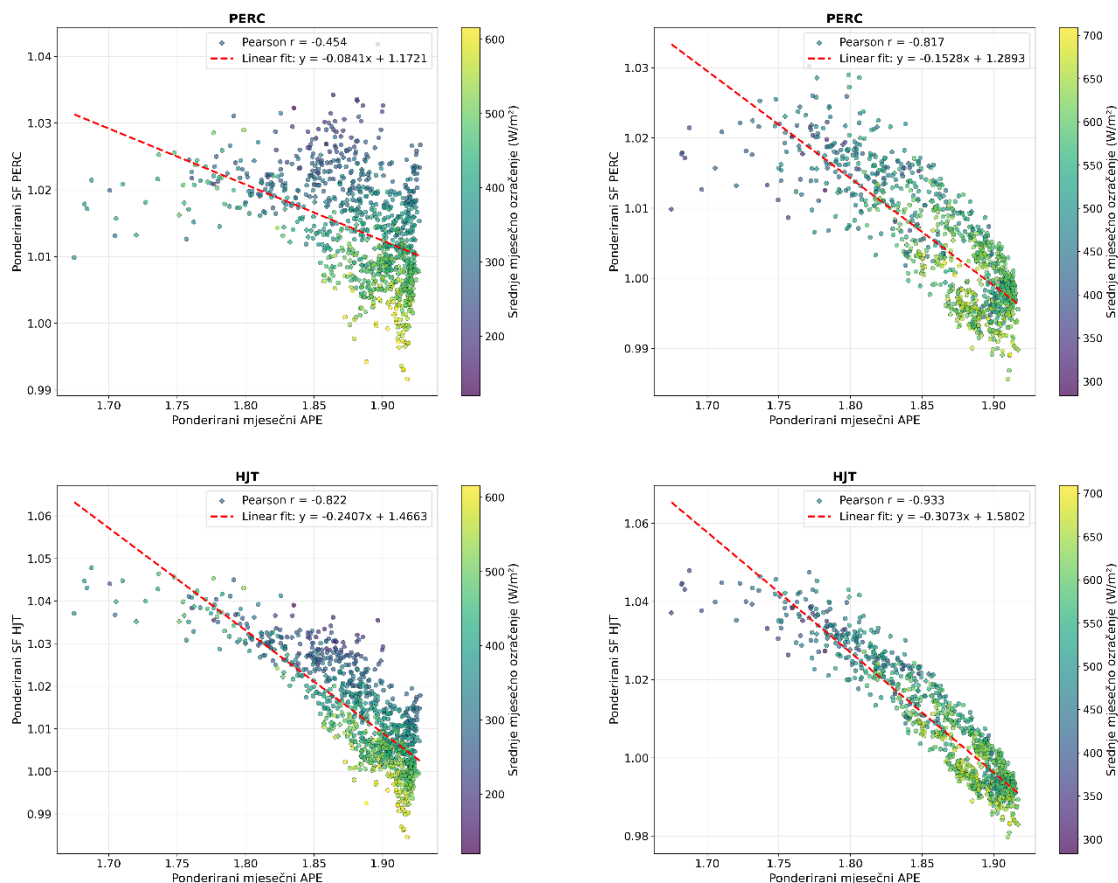


Slika 3.28 Dva spektra s istom vrijednosti APE, jedan za vedro nebo, drugi za oblačno.

S obzirom na to da „jastogova klijesta“ nastaju primarno u trenucima niskog ozračenja, logično je promotriti što se događa kada se umjesto trenutnih promatraju mjesečne i godišnje ozračenjem ponderirane vrijednosti SF-a u odnosu na APE. Ponderiranjem s ukupnim ozračenjem i agregacijom na mjesečnoj skali, energetski nevažni trenuci s rubnim APE vrijednostima dobivaju puno manju težinu, pa grafički raspored točaka odražava ponašanje spektra u uvjetima koji dominiraju godišnjoj proizvodnji energije. Na taj način se ispituje u kojoj mjeri jednim sumarnim spektralnim indeksom na mjesečnoj razini možemo precizno opisati faktor spektralne korekcije. Na slikama 3.29 i 3.30 prikazani su odnosi mjesečnih, ozračenjem ponderiranih vrijednosti SF-a i APE-a za svih 79 lokacija za a-Si, CdTe, PERC i HJT kao reprezentativne tehnologije, i to zasebno za sve uvjete neba (lijeva strana) i za vedro nebo (desna strana). Odnos ozračenjem ponderiranih godišnjih SF i APE vrijednosti za svih 79 lokacija prikazan je u Prilog A na slici A.5, gdje se dodatno potvrđuju isti obrasci kao i s mjesečnim.

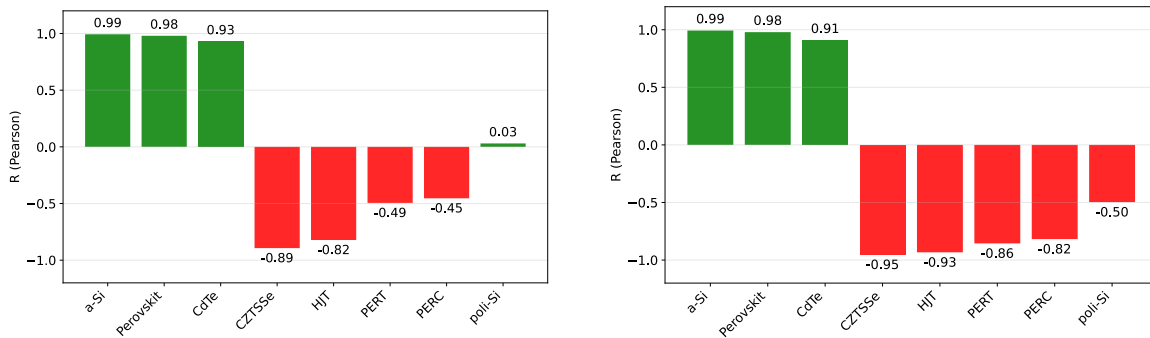


Slika 3.29 Odnos između mjesečnih ponderiranih vrijednosti SF-a i APE-a za sve uvjete neba (lijevo) i vedro nebo (desno) za a-Si (gore) i CdTe (dolje).



Slika 3.30 Odnos između mjesečnih ponderiranih vrijednosti SF-a i APE-a za sve uvjete neba (lijevo) i vedro nebo (desno) za mono-Si PERC (gore) i mono-Si HJT (dolje).

Na slici 3.31 izdvojeni su odgovarajući Pearsonovi koeficijenti korelacije za sve tehnologije. Rezultati pokazuju da a-Si, perovskit i CdTe imaju iznimno visoku korelaciju mjesečnih SF-APE vrijednosti i za sve uvjete neba i za vedro nebo ($\approx 0,99$, $0,98$ i $0,93$), što potvrđuje da APE vrlo vjerno opisuje sezonske promjene SF-a za tehnologije s užim spektralnim odzivom u rasponu 400-900 nm. Za CZTSSe i HJT korelacija je nešto niža za sve uvjete neba (oko $-0,89$ i $-0,82$), ali i dalje ostaje vrlo visoka u režimu vedrog neba, što ukazuje da APE i za ove tehnologije dobro hvata sezonski trend kada su oblačni efekti uklonjeni. PERC i PERT pokazuju znatno nižu korelaciju za sve uvjete neba (oko $-0,45$ i $-0,49$), no za vedro nebo koeficijenti rastu na približno $-0,86$ i $-0,82$, što znači da APE i ovdje postaje robustan prediktor čim se eliminira utjecaj naoblake. Polikristalni silicij praktički ne pokazuje korelaciju s APE-om za sve uvjete neba ($r \approx 0,03$), dok se za vedro nebo korelacija penje tek do umjerenih vrijednosti ($r \approx -0,50$), što odražava njegov širi i nešto „zamućeniji“ spektralni odziv. U prilogu A u tablici A.3 prikazan je i odnos između mjesečnih ponderiranih vrijednosti SF-a i APE-a.



Slika 3.31 Faktor korelacije između mjesečnih ponderiranih vrijednosti SF-a i APE-a za sve uvjete neba (lijevo) i za vedro nebo (desno).

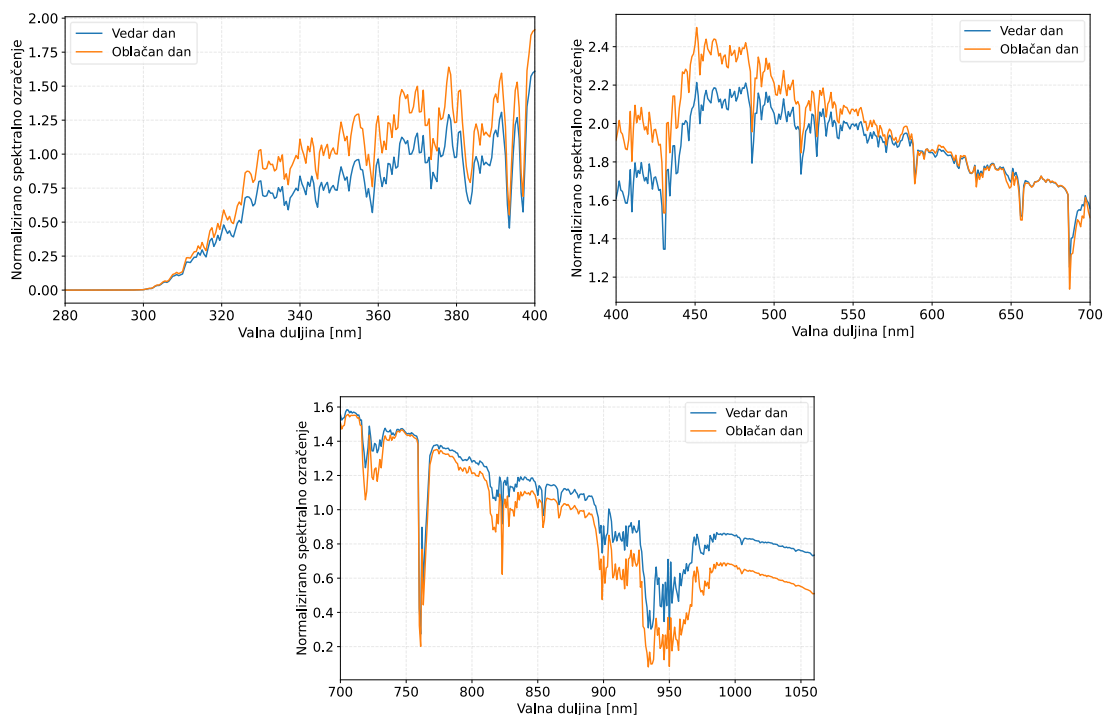
Na temelju svih navedenih opažanja može se zaključiti da je APE iznimno koristan indeks za opis spektra kada se koristi kao nezavisna veličina, nevezano uz konkretnu FN tehnologiju. Kada se primjenjuje za opis faktora spektralne korekcije, APE vrlo dobro opisuje ponašanje materijala s užitim spektralnim odzivom, poput a-Si, perovskita i CdTe, te u značajnoj mjeri i HJT-a i CZTSSe, osobito u uvjetima vedrog neba. Za PERC i PERT APE je također vrlo informativan u režimu vedrog neba, dok je kod svih uvjeta neba složeniji odnos. Stoga se preporučuje APE primarno koristiti za proračun mjesečnih i godišnjih SF vrijednosti, gdje agregacija i ponderiranje ozračenjem prirodno „odrežu“ problematične rubne slučajeve. Ujedno, za postizanje bijektivnosti i još preciznijeg modeliranja SF-a, APE bi u praktičnim modelima trebao biti dopunjen s jednom ili dvije dodatne veličine izvedene iz mjerenog spektra (npr. indeksom vedrine neba ili spektralnim omjerima u odabranim valnim opsezima), čime se hvataju razlike između fizikalno različitih spektralnih stanja koja dijele istu APE vrijednost.

3.3.3. Veza između faktora spektralne korekcije i indeksa vedrine neba

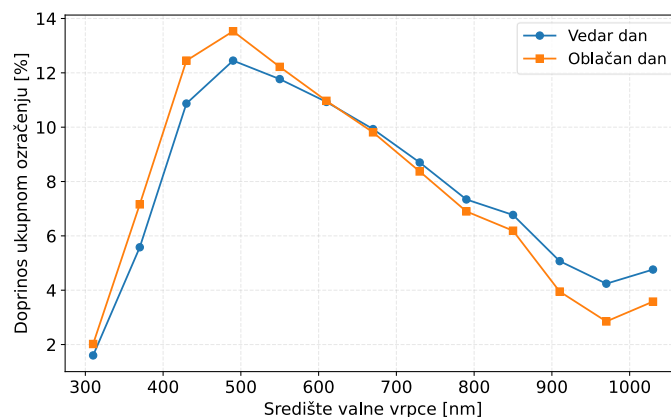
Na temelju dobivenih rezultata jasno se vidi da oblaci imaju jako velik utjecaj na raspodjelu energije po valnim područjima, a ne samo ukupnu razinu ozračenja. U oba spektra ukupni integrirani iznos je normaliziran na 1000 W/m^2 , pa se valne vrpce mogu izravno uspoređivati preko preko postotaka doprinosa pojedinih valnih intervala ukupnoj energiji (engl. *percentage contribution to total irradiance - PCTTI*).

Usporedba dvaju spektra na slici 3.32, jednog za vedar dan i drugog za oblačan, uz pripadnu PCTTI tablicu po valnim vrpčama danu u Prilogu A pokazuje da u UV i plavom dijelu spektra (280-400 nm) zamućeno nebo ima veći relativni doprinos ukupnoj energiji od vedrog neba. U prvih 120 nm (280-400 nm) ukupni PCTTI raste s oko 7,2% na više od 9% između prvog i drugog spektra. U vidljivom području od 400 do 700 nm oba spektra imaju najveće pojedinačne doprinose, ali oblačni slučaj sustavno pokazuje veće postotke u kraćim valnim duljinama (400-

520 nm), dok se razlike smanjuju prema žuto-crvenom dijelu spektra. U NIR području (700-1060 nm) razlike se obrću: vedri dan zadržava nešto veći udio energije u duljim valnim duljinama, dok oblačni dan bilježi smanjenje PCTTI-ja, osobito u intervalima 880-1060 nm. Ovakav obrazac znači da oblačno nebo relativno ‘pojačava’ kratkovalni dio spektra i smanjuje doprinos dugovalnog. U kontekstu FN modula, to implicira da tankoslojne tehnologije s većim zabranjenim pojasom imaju relativno povoljnije uvjete pod oblačnim nebom, dok tehnologije koje snažno koriste NIR dio spektra također ostvaruju spektralne dobitke, ali u manjem apsolutnom iznosu od spektralno uskih tankoslojnih materijala.

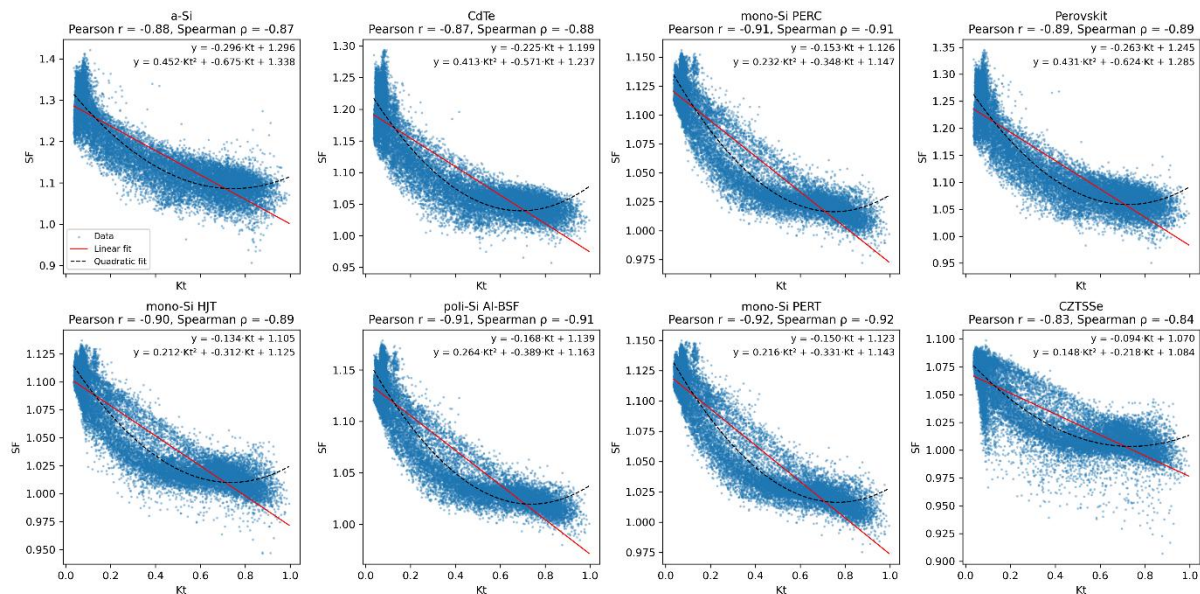


Slika 3.32 Usporedba spektra za vedar i oblačan dan.



Slika 3.33 Usporedba spektara za vedar i oblačan dan po valnim vrpčama.

Korelacijski rezultati potvrđuju da se SF sustavno mijenja s naoblakom, i to konzistentno na satnoj i mjesečnoj skali. Trenutne SF vrijednosti za svih osam FN tehnologija pokazuju vrlo jaku negativnu korelaciju s K_t , uz Pearsonove koeficijente između približno -0,83 (CZTSSe) i -0,92 (mono-Si PERT). To znači da kako se K_t smanjuje (veći udio raspršene komponente i jače zamućenje atmosfere), SF se sustavno povećava, a odnos je istodobno izrazito monoton i linearan. Kristalne silicijske tehnologije s PERC, PERT i HJT strukturama imaju najviše korelacijske koeficijente ($|r| \approx 0,91-0,92$).

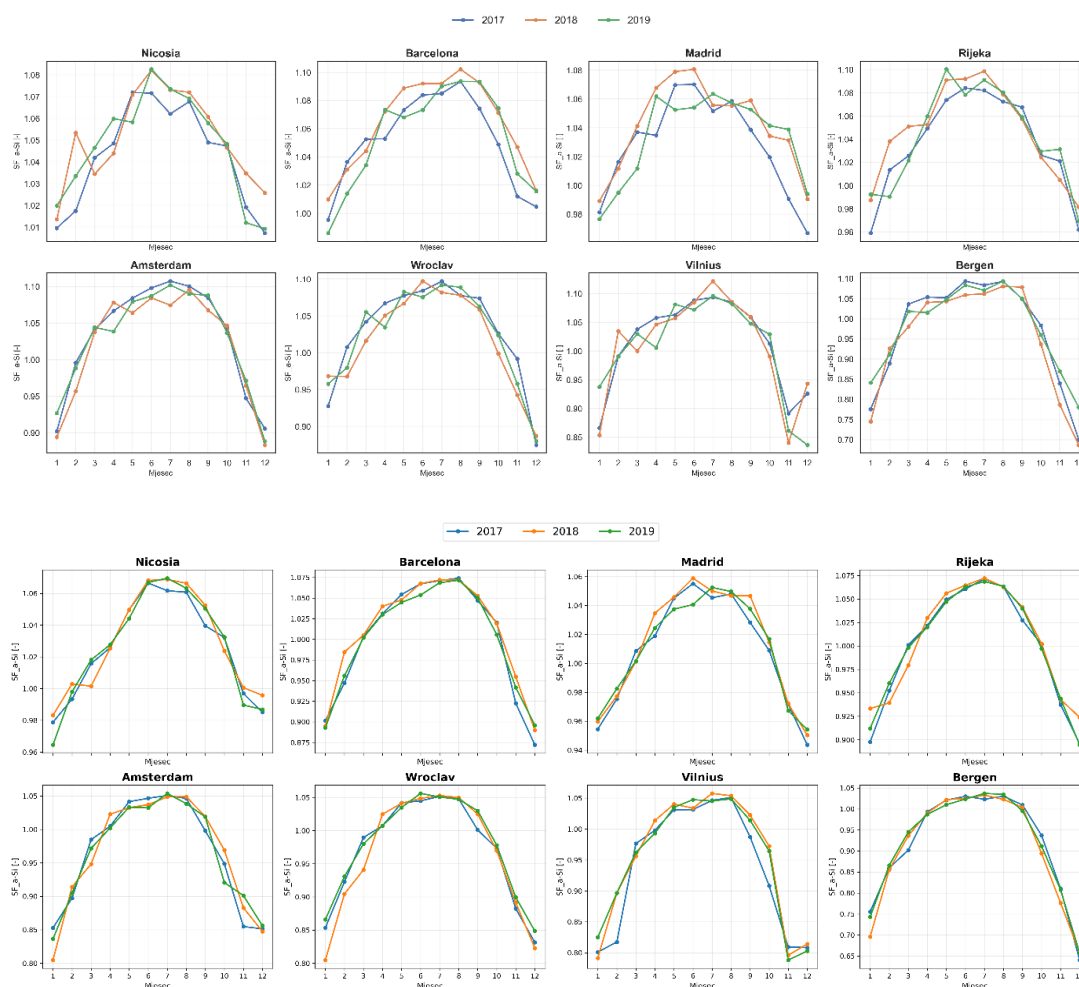


Slika 3.34 Odnos trenutnih SF i K_t vrijednosti.

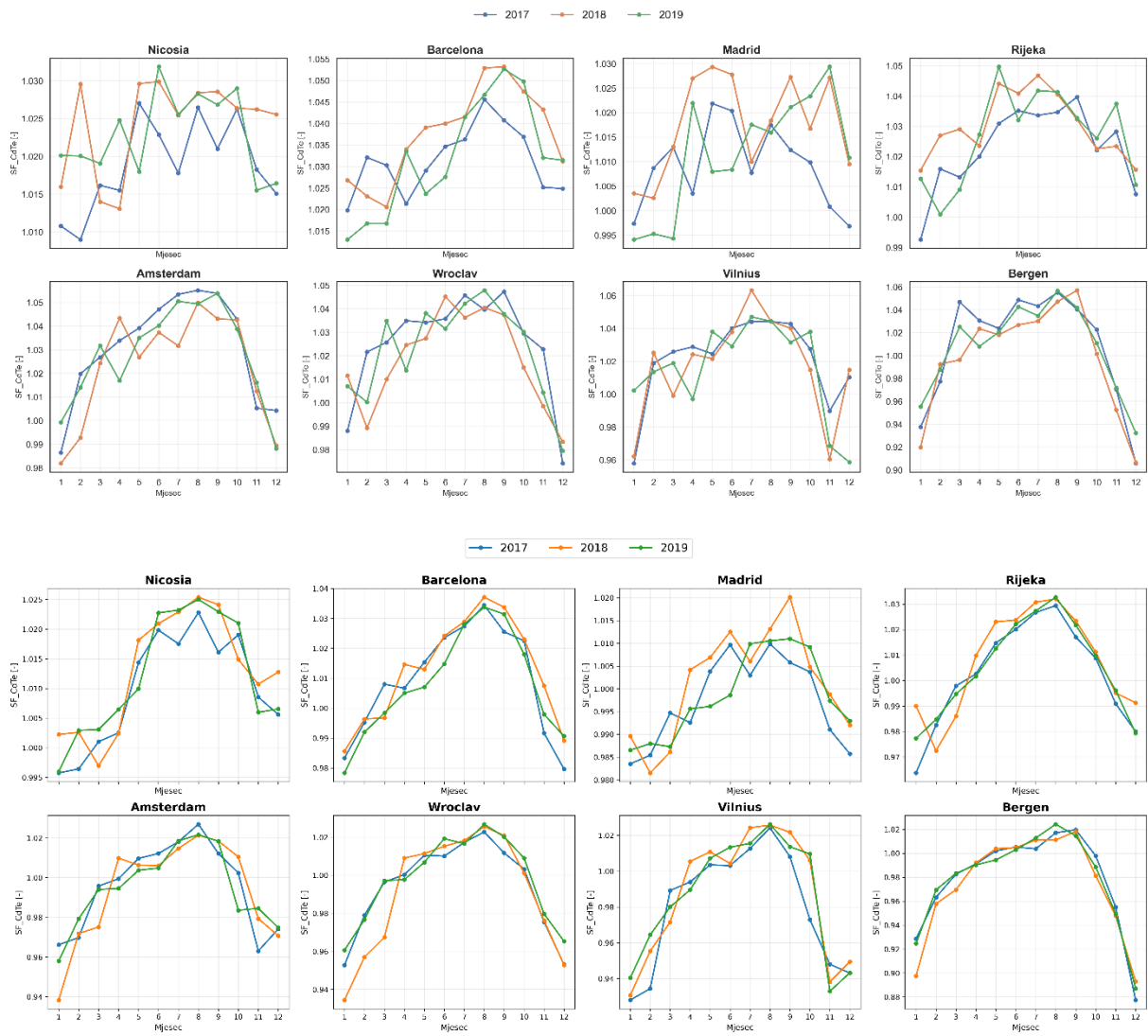
Ovi rezultati su potpuno konzistentni s prethodnom analizom PCTTI, gdje je pokazano da oblačno nebo relativno pojačava UV i plavi dio spektra (280-400 nm) i smanjuje doprinos NIR područja (700-1060 nm). Smanjenje K_t (povećanje naoblake) znači upravo prelazak sa crvenijeg spektra vedrog neba na plaviji spektar oblaka, što je povoljnije za tankoslojne tehnologije s većim zabranjenim pojasom i manje povoljno za tehnologije koje snažno koriste NIR dio spektra. Jako negativne korelacije između SF i K_t stoga kvantitativno potvrđuju da tankoslojni moduli i kristalni silicij ne reagiraju samo na promjene ukupnog ozračenja, nego vrlo osjetljivo prate i promjene u spektralnoj raspodjeli izazvane različitim atmosferskim varijablama, što je ključna motivacija za uvođenje SF vrijednosti u energetske modele. Indeks vedrine neba očigledno predstavlja potencijalno iznimno korisnu atmosfersku varijablu za modeliranje SF faktora.

3.3.4. Vremenska analiza faktora spektralne korekcije

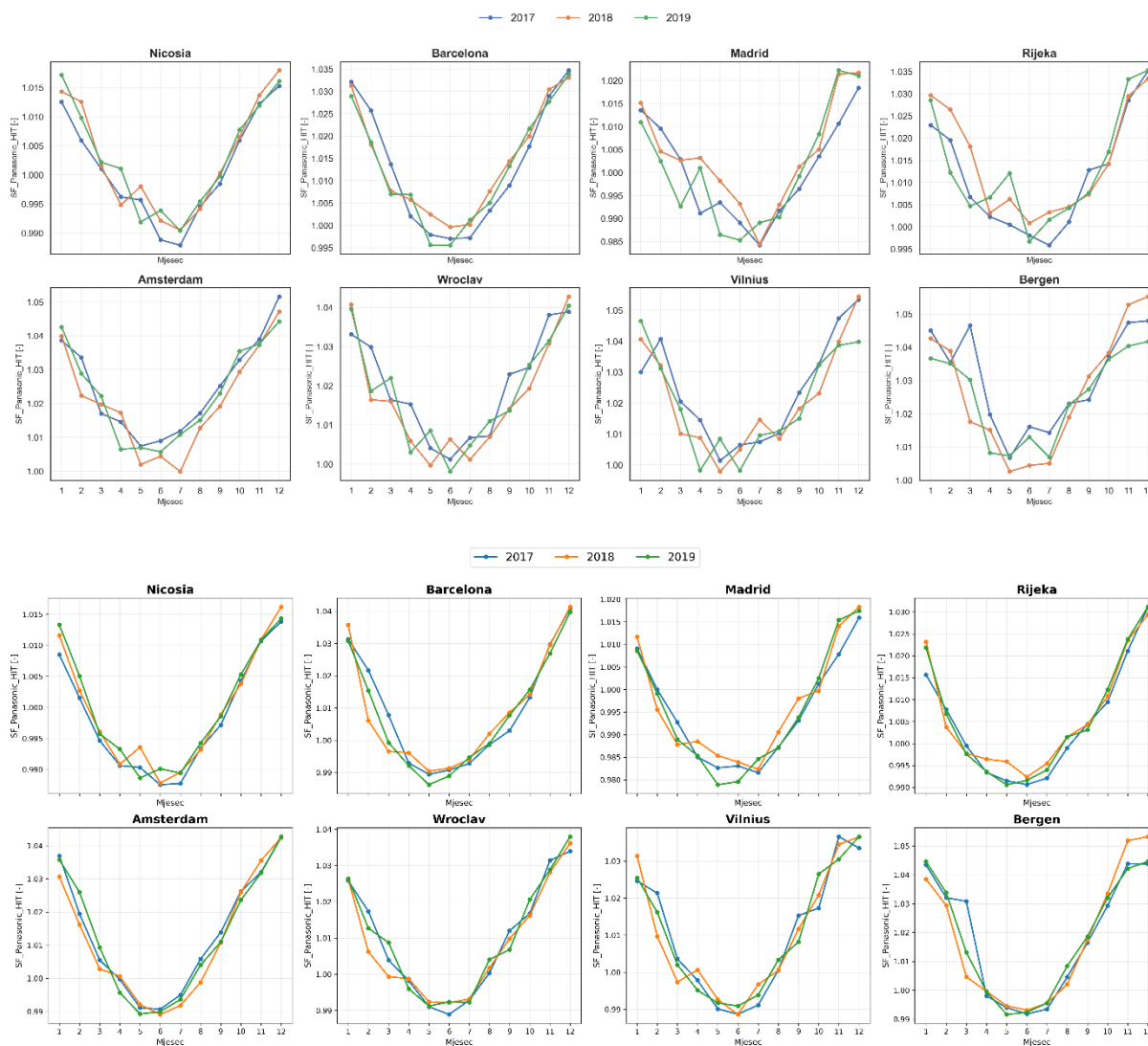
Vremenska varijabilnost faktora spektralne korekcije analizirana je na istom skupu od osam lokacija koje reprezentiraju različite europske klimatske tipove (suhe, mediteranske, oceanske i kontinentalne uvjete), i to za tri uzastopne godine (2017.-2019.), analogno pristupu korištenom za analizu APE-a u poglavlju 3.2.3. Za svaku lokaciju izračunate su ozračenjem ponderirane mjesečne i godišnje SF vrijednosti u rasponu 350-1050 nm za osam razmatranih FN tehnologija (a-Si, CdTe, CZTSSe, perovskit, poli-Si, mono-Si PERC, PERT i HJT), te koeficijent varijacije (CV) na mjesečnoj skali, zasebno za sve uvjete neba i za vedro nebo. Na taj način kvantificira se koliko su međugodišnje promjene faktora spektralne korekcije varijabilne u odnosu na njihovu srednju intra-godišnju vrijednost za pojedinu tehnologiju i klimu. Mjesečne vrijednosti SF-a za tri godine za svih osam lokacija, za odabrane tehnologije, prikazane su na slikama 3.35 (a-Si), 3.36 (CdTe) i 3.37 (mono-Si HJT), dok su pripadne vrijednosti koeficijenta varijacije detaljno analizirane u nastavku poglavlja.



Slika 3.35 Mjesečne vrijednosti SF-a za tri promatrane godine za a-Si.



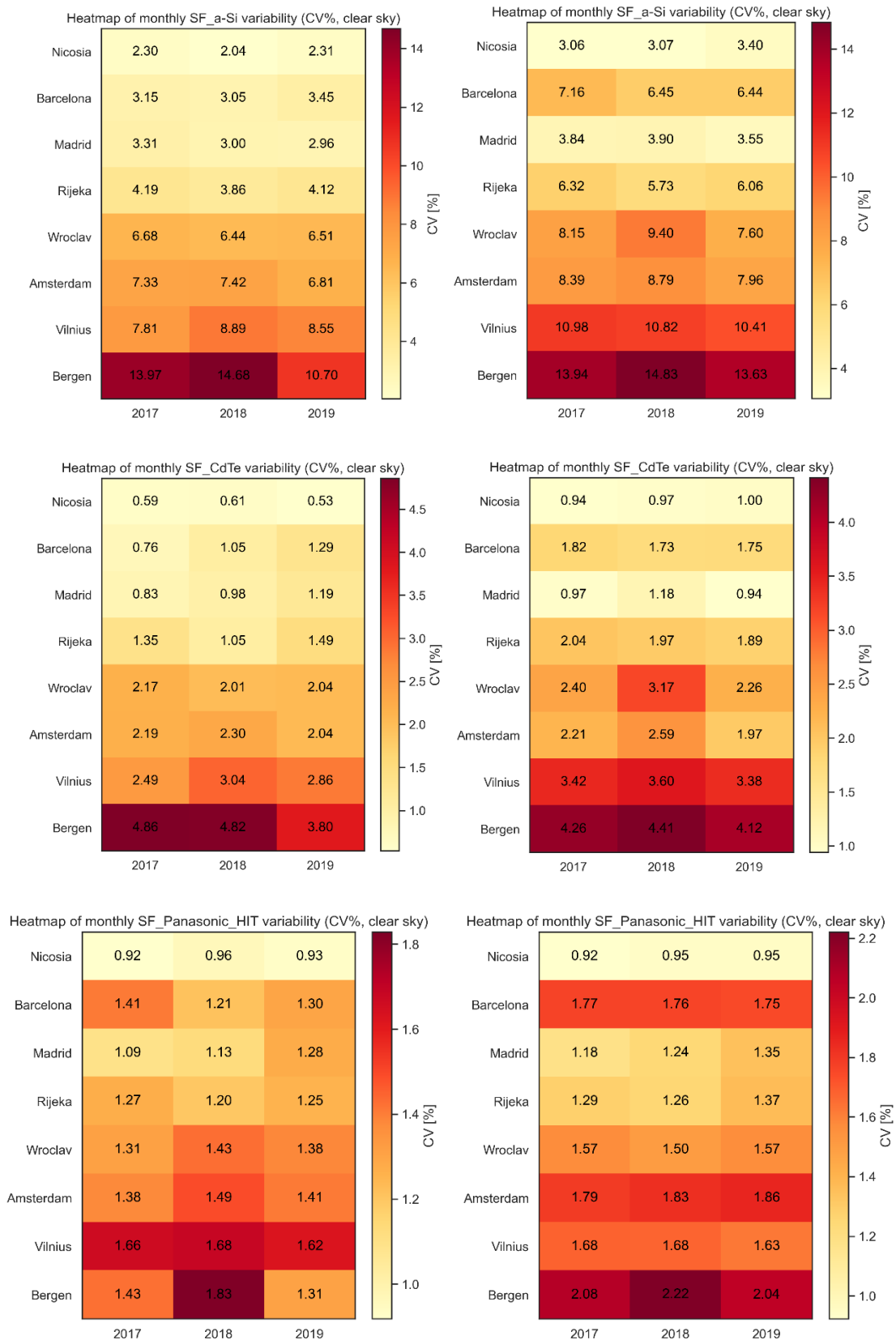
Slika 3.36 Mjesečne vrijednosti SF-a za tri promatrane godine za CdTe.



Slika 3.37 Mjesečne vrijednosti SF-a za tri promatrane godine za mono-Si HJT.

Toplinske mape koeficijenta varijacije mjesečnih, ozračjenjem ponderiranih vrijednosti SF-a za sve uvjete neba i vedro nebo izrađene su za svih osam FN tehnologija, ali su kao reprezentativni primjeri prikazane samo tehnologije a-Si, CdTe i Panasonic HJT.

Za sve tri prikazane tehnologije uočava se vrlo sličan geografski obrazac: mediteranske lokacije (Nicosia, Barcelona, Madrid, Rijeka) pokazuju niske CV vrijednosti reda nekoliko postotaka, što ukazuje na vrlo stabilan sezonski profil SF vrijednosti između promatranih godina, dok oceanske i sjevernije kontinentalne lokacije (Amsterdam, Wroclav, Vilnius, Bergen) imaju povišene CV vrijednosti, koje za CdTe i a-Si dosežu 5-15% za sve uvjete neba, osobito u Bergenu i Vilniusu.

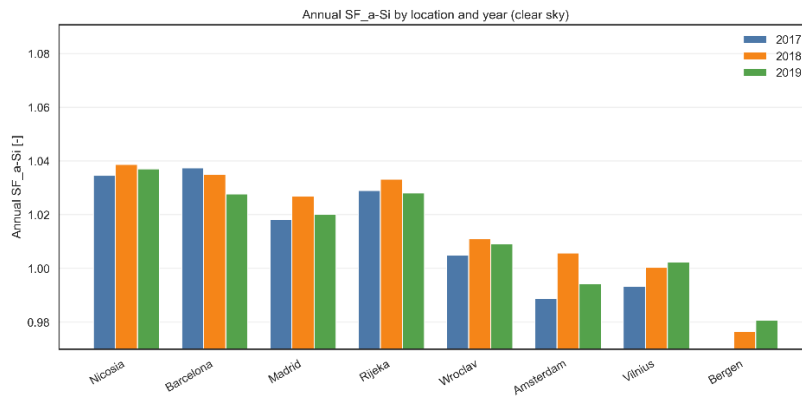
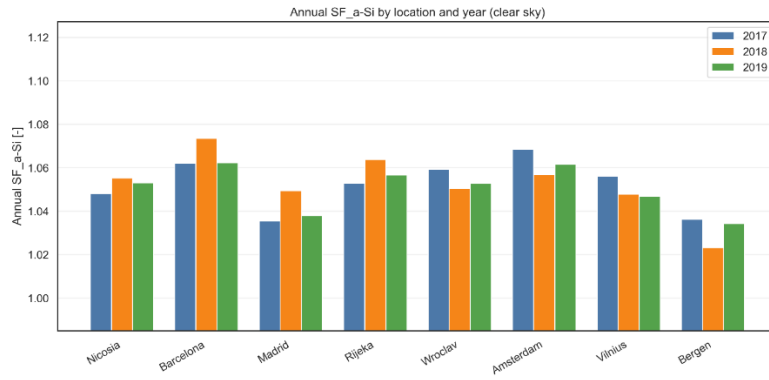


Slika 3.38 Toplinske mape unutargodišnjih varijacija SF-a za a-Si (gore), CdTe (sredina) i mono-Si HIT (dolje).

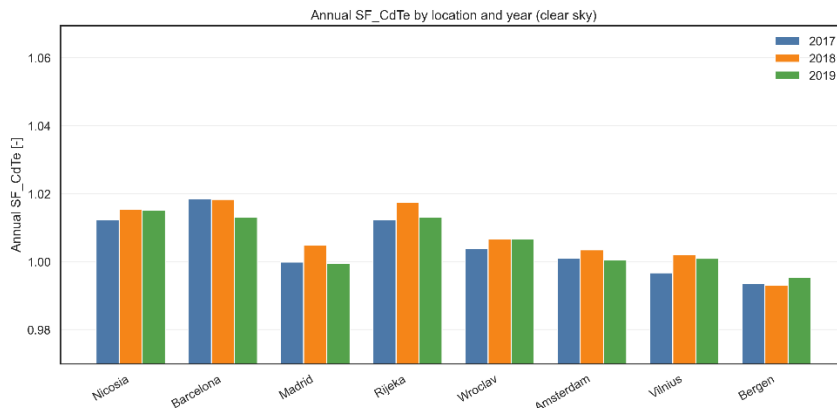
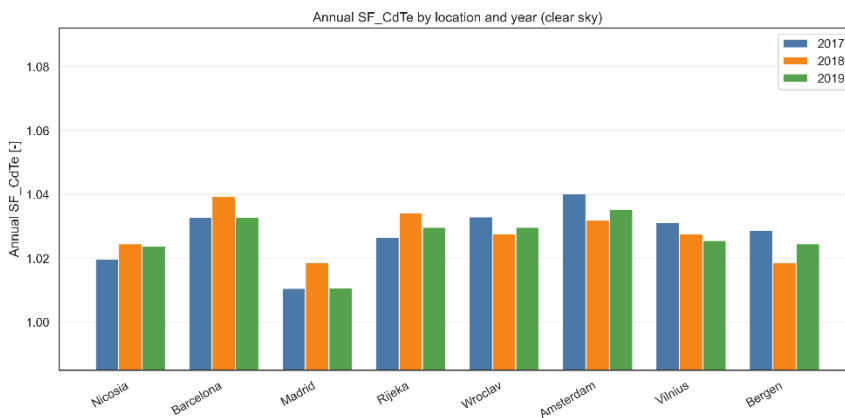
U režimu vedrog neba varijabilnost dodatno raste na svim lokacijama i za sve tri tehnologije, jer se promatra samo međugodišnja promjena spektra u trenucima visokog ozračenja, bez ujednačavanja koje donosi raspršena komponenta u oblačnim uvjetima; to je posebno izraženo na oceanskim i sjevernijim kontinentalnim lokacijama, gdje su CV vrijednosti za a-Si i CdTe osjetno veće nego za HJT, koji pokazuje nešto ujednačeniji odziv.

Godišnje, ozračenjem ponderirane vrijednosti spektralnog faktora korekcije za odabrane tehnologije a-Si, CdTe i HJT pokazuju vrlo konzistentan, ali tehnologijski diferenciran obrazac između lokacija i uvjeta neba, s pomacima od nekoliko postotaka oko referentne vrijednosti 1 koji su za tankoslojne tehnologije fizički itekako relevantni. Za a-Si i CdTe godišnji SF za sve uvjete neba na svim lokacijama stabilno ostaje iznad 1, pri čemu su mediteranske lokacije (Nicosia, Barcelona, Madrid, Rijeka) sustavno „povišene“ (tipično nekoliko postotaka iznad 1), dok su oceanske i sjevernije kontinentalne lokacije (Amsterdam, Wroclaw, Vilnius, Bergen) nešto bliže jedinici ili pokazuju blaži porast, što odražava razlike u godišnjoj raspodjeli spektra između toplijeg, suhog Mediterana i vlažnih oceansko-kontinentalnih klima. HJT tehnologija u istim uvjetima pokazuje znatno manja relativna odstupanja (tipično unutar oko $\pm 1\%$), s vrijednostima vrlo blizu 1 na svim lokacijama, što je u skladu s njenim širim i spektralno „robustnijim“ odzivom, odnosno manjom osjetljivošću na relativno sitne promjene APE-a u odnosu na tankoslojne tehnologije.

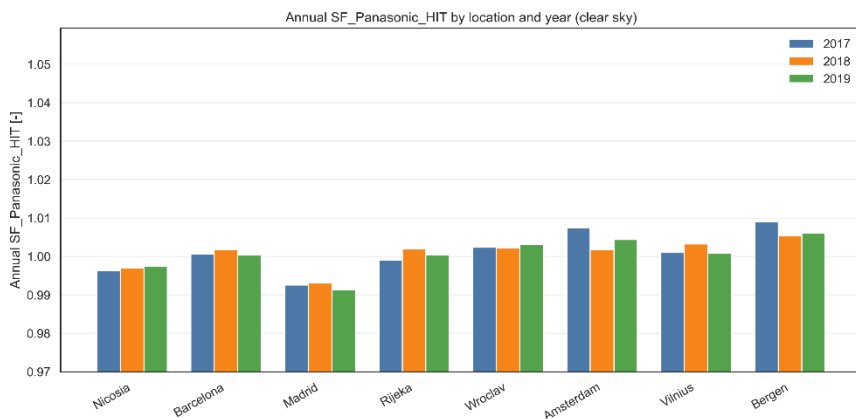
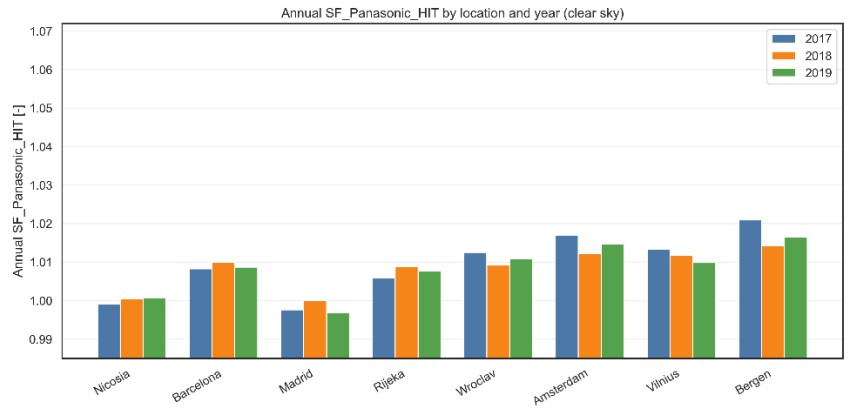
Za uvjete vedrog neba a-Si i CdTe pokazuju dodatno naglašene geografske razlike: mediteranske lokacije i dalje imaju SF nešto iznad 1, dok na sjevernijim i oceanskim lokacijama vrijednosti mogu pasti ispod 1 za nekoliko postotaka, osobito na Bergenu, gdje dominantna kombinacija većih masa zraka i izraženije raspršeno-izravne dinamike vodi prema „crvenijem“ spektru koji penalizira tanke apsorbere. HJT i u clear-sky režimu ostaje spektralno stabilniji – godišnje vrijednosti SF-a za vedro nebo na svim lokacijama kreću se vrlo blizu 1, s relativnim odstupanjima reda nekoliko desetinki postotka, što potvrđuje da je ova tehnologija manje osjetljiva na fine varijacije APE-a i spektralne distribucije nego a-Si i CdTe, no ne do te mjere da bi spektar postao zanemariv u dugoročnoj energetskej analizi ili pri kalibraciji SF modela.



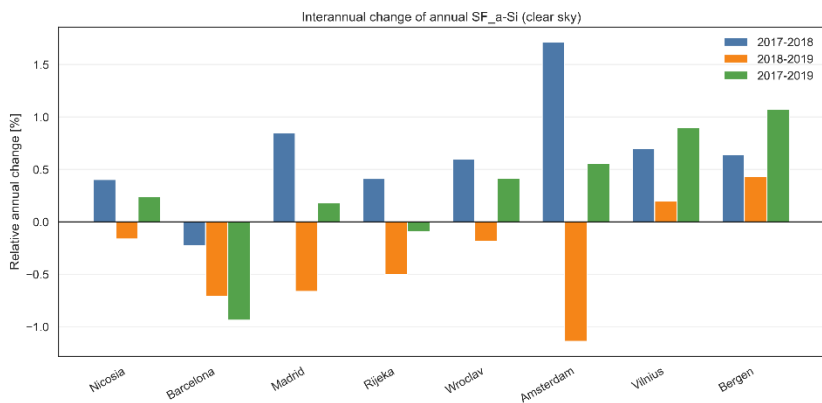
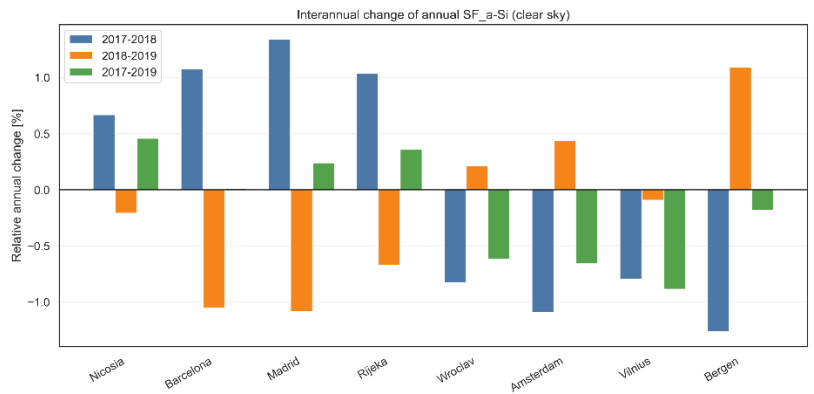
Slika 3.39 Godišnje ponderirane vrijednosti SF-a za a-Si.



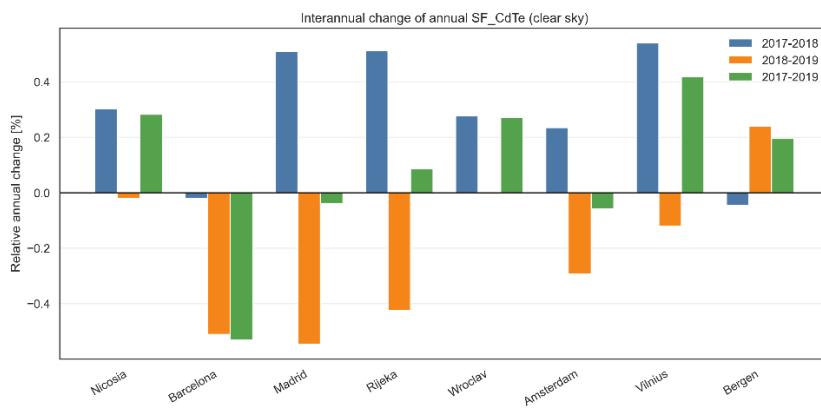
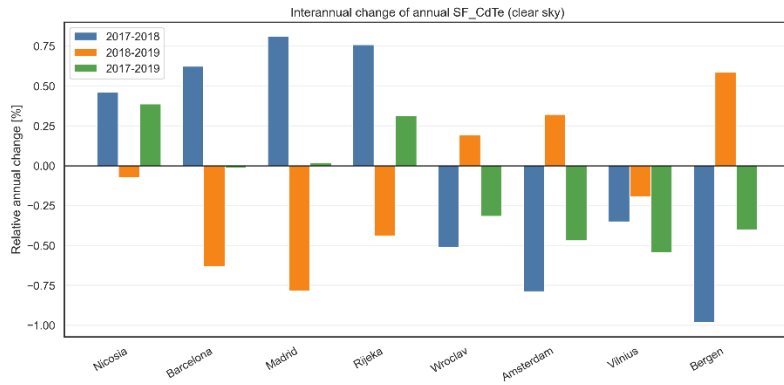
Slika 3.40 Godišnje ponderirane vrijednosti SF-a za CdTe.



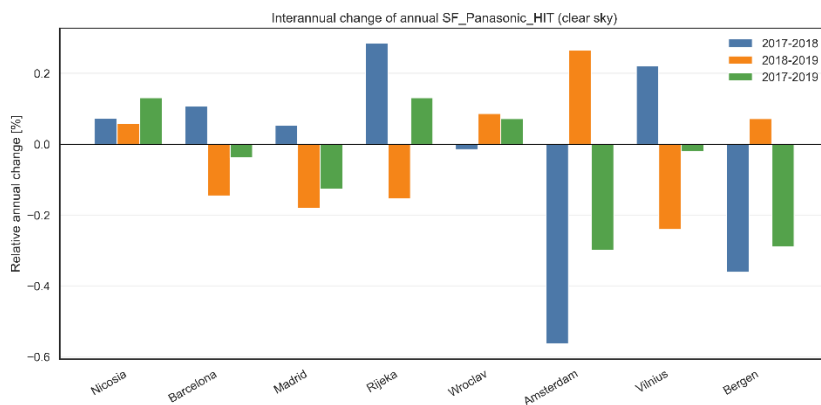
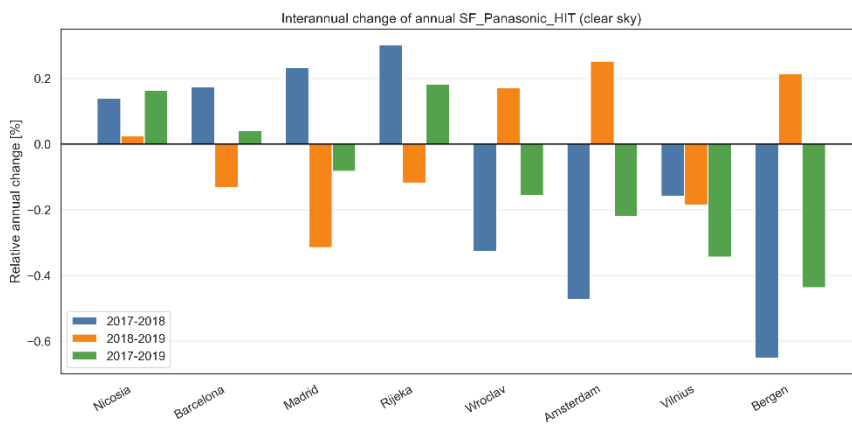
Slika 3.41 Godišnje ponderirane vrijednosti SF-a za mono-Si HJT.



Slika 3.42 Međugodišnje razlike SF-a za a-Si.



Slika 3.43 Međugodišnje razlike SF-a za CdTe.



Slika 3.44 Međugodišnje razlike SF-a za mono-Si HJT.

3.4. Spektralno utemeljena klasifikacija europskih lokacija

Na temelju cjelokupne prethodno provedene spektralne analize, završni korak ovog poglavlja predstavlja spektralno utemeljenu klasifikaciju 79 analiziranih europskih lokacija. Postupak je proveden za tri reprezentativne FN tehnologije - perovskit, CdTe te mono-Si HJT, i rezultira jasno razdvojenim spektralnim zonama. U nastavku se detaljno opisuje algoritam ovog postupka u svim koracima, uključujući kriterije odabira parametara, kako bi postupak bio ponovljiv.

Klasifikacija je provedena u dvije hijerarhijski povezane faze. Prva faza temelji se isključivo na uvjetima vedrog neba, koji predstavljaju stabilnu referentnu osnovu jer uvjeti vedrog neba odražavaju dominantno geografske i atmosferske razlike (masa zraka, aerosoli, taložna vodena para) bez varijabilnosti koju unose oblaci. Druga faza unutar svakoga dobivenog klastera provodi subklasteriranje na temelju mjera učinka naoblake. Na taj se način dobiva dvorazinska, fizikalno interpretabilna klasifikacija europskog prostora.

3.4.1. Selekcija prostora značajki i klasteriranje u uvjetima vedrog neba

Prije samog klasteriranja bilo je potrebno odlučiti kojim značajkama opisati svaku od 79 analiziranih lokacija, budući da kvaliteta klasteriranja ovisi o tome koje informacije algoritam prima kao ulaz. Ispitan je niz prostora značajki temeljenih na faktoru spektralne korekcije (SF) za vedro nebo: jednodimenzijски prostor koji koristi samo godišnji ozračenjem ponderirani SF (1F), dvodimenzijски prostor koji dodaje ljetni SF (ponderirane vrijednosti SF za period od lipnja do rujna) (2F), trodimenzijски koji uključuje i zimski SF (prosinac-ožujak) (3F) te prošireni šestodimenzijски prostor koji obuhvaća sezonske prosjeke, amplitudu i mjere varijabilnosti (6F). Odabir optimalnog prostora značajki i optimalnog broja klastera k proveden je u sklopu jedinstvene analize: za svaki od četiri prostora koji su kandidati za prostor značajki algoritam K-means pokrenut je za svaki k od dva do osam, a za svaki par (prostor, k) izmjereno je pet internih metrika kvalitete klastera. Uz navedenih pet metrika, za svaki k praćena je i inercija radi vizualne identifikacije lakta. Za razliku od ostalih pet metrika koje istovremeno mjere kompaktnost i separaciju klastera, inercija sama po sebi uvijek pada s porastom k i stoga služi isključivo kao vizualni filter za sužavanje raspona potencijalnih vrijednosti k , a ne kao samostalna mjera kvalitete particije. U nastavku je opisan K-means algoritam i sve primijenjene metrike.

K-means, je jedan od najšire primjenjivanih algoritama za grupiranje podataka [153]. Cilj algoritma je rasporediti n lokacija u k klastera tako da se minimizira ukupna unutar-klasterska varijanca, tj. da lokacije unutar istog klastera budu što sličnije međusobno, a što različitije od lokacija u drugim klasterima. Formalno, algoritam minimizira kriterijsku funkciju:

$$J = \sum_{j=1}^k \sum_{i \in C_j} \|x_i - c_j\|^2 \quad (3.14)$$

gdje je x_i vektor značajki lokacije i , c_j središte klastera j , a C_j skup svih lokacija dodijeljenih klasteru j . Algoritam se izvodi iterativno u četiri koraka. U koraku inicijalizacije odabire se k početnih središta klastera metodom k-means++, koja za razliku od nasumičnog odabira maksimizira međusobnu udaljenost početnih središta i time smanjuje osjetljivost na loš početni odabir te ubrzava konvergenciju. U koraku dodjele svaka se lokacija pridružuje klasteru čije je središte njoj najbliže prema euklidskoj udaljenosti. U koraku ažuriranja središte svakog klastera premješta se u aritmetičku sredinu svih lokacija koje su mu dodijeljene. Koraci dodjele i ažuriranja ponavljaju se naizmjenično sve dok se dodjela lokacija ne prestane mijenjati, što označava konvergenciju algoritma u lokalni minimum kriterijske funkcije J .

Kvaliteta klusterskih particija evaluirana je skupom pet komplementarnih metrika koje su u literaturi identificirane kao najinformativnije i najčešće primjenjivane u sustavnim usporedbama algoritama klasteriranja [154]: analizom siluete, Davies-Bouldin indeksom, Calinski-Harabasz indeksom, unutar-klasterskom varijancom i koeficijentom varijacije veličine klastera.

Analiza siluete mjeri koliko je svaka lokacija geometrijski dobro smještena unutar vlastitog klastera u usporedbi s najbližim susjednim klasterom. Za svaku lokaciju i definira se:

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}}, s(i) \in [-1, +1] \quad (3.15)$$

gdje je $a(i)$ prosječna udaljenost točke i od svih točaka u istom klasteru (mjera kompaktnosti), a $b(i)$ prosječna udaljenost od svih točaka u najbližem susjednom klasteru (mjera separacije). Vrijednost bliska jediničnoj označava lokaciju koja je daleko od susjednih klastera i bliska vlastitom centru, a vrijednost blizu nule upozorava na rubnu lokaciju koja bi jednako dobro mogla pripadati susjednom klasteru. Negativna vrijednost sugerira pogrešnu dodjelu. Globalna analiza siluete uzima aritmetičku sredinu $s(i)$ po svim tehnologijama.

Davies-Bouldin indeks (DBI) za svaki par klaster i i j računa omjer zbroja unutar-klasterskih raspršenosti i međuklasterske udaljenosti središta klastera:

$$DBI = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \max_{j \neq i} \left(\frac{\sigma_i + \sigma_j}{d(c_i, c_j)} \right) \quad (3.16)$$

gdje su σ_i i σ_j prosječne udaljenosti točaka od središta klastera i odnosno j , a $d(c_i, c_j)$ euklidska udaljenost između dvaju središta klastera. Manji iznos DBI znači kompaktnije i bolje razdvojene klastere

Calinski-Harabasz indeks (CHI) daje omjer ukupne međuklasterske i unutarklasterske disperzije:

$$CHI = \frac{SS_B / (k - 1)}{SS_W / (n - k)} \quad (3.17)$$

gdje je SS_B suma kvadrata udaljenosti središta klastera od globalnog središta (ponderirana brojem lokacija), SS_W ukupna suma kvadrata udaljenosti unutar klastera, k broj klastera i n ukupan broj lokacija. Viši CHI znači da su klasteri međusobno dobro razdvojeni, a interno kompaktni.

Unutar-klasterska varijanca (WCV) izravno mjeri prosječnu kvadratnu udaljenost svake lokacije od središta vlastitog klastera u standardiziranom prostoru značajki:

$$WCV = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|x_i - c_{k(i)}\|^2 \quad (3.18)$$

gdje je $c_{k(i)}$ središte klastera kojemu pripada lokacija x_i . Niža WCV znači kompaktnije klastere.

Koeficijent varijacije veličine klastera (CV) mjeri relativnu neujednačenost broja lokacija po klasterima, definiran kao omjer standardne devijacije i aritmetičke sredine broja lokacija po klasterima:

$$CV = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|x_i - c_{k(i)}\|^2 \quad (3.19)$$

Manji CV označava ujednačenije klustere, čime se izbjegavaju rješenja u kojima jedan klaster obuhvaća gotovo sve lokacije.

Metoda lakta (WCSS) vizualna je heuristička tehnika za određivanje optimalnog broja klastera k . Za svaki ispitani k mjeri se inercija, definirana kao ukupna suma kvadrata euklidskih udaljenosti svake lokacije od središta vlastitog klastera:

$$WCSS = \sum_{i=1}^n \|x_i - c_{k(i)}\|^2 \quad (3.20)$$

gdje je $c_{k(i)}$ središte klastera kojemu pripada lokacija x_i . Inercija po definiciji pada s povećanjem k jer veći broj manjih klastera smanjuje unutarnje udaljenosti. U krajnjem slučaju $k = n$ dalo bi inerciju nula jer bi svaka lokacija bila vlastiti klaster. Zbog toga inercija sama po sebi ne može biti kriterij kvalitete, već se vizualno analizira graf ovisnosti inercije o k . Na tom grafu krivulja tipično ima oblik slova "L" - strmo pada za male vrijednosti k , a potom se izravna i nastavlja padati znatno sporije. Točka u kojoj se nagib krivulje dramatično smanjuje naziva se lakat i identificira se kao kandidat za optimalni broj klastera: dodavanje novih klastera nakon te točke donosi zanemarivo smanjenje inercije uz povećanje složenosti modela.

Rezultati analize za $k = 4$ prikazani su u tablici 3.2 za perovskit, CdTe i mono-Si HJT redom. Prostor 1F konzistentno ostvaruje najbolje vrijednosti svih pet internih metrika za sve tri tehnologije pri $k = 4$, a prostori 2F, 3F i 6F nisu ostvarili bolje vrijednosti ni pri jednoj drugoj ispitanoj vrijednosti k . Koeficijent siluete je za prostor 1F najviši kod svih triju tehnologija (0,571 za perovskit i CdTe; 0,597 za mono-Si HJT), Davies-Bouldin indeks najniži (0,485; 0,496; 0,473), a Calinski-Harabasz indeks daleko najveći (358,64; 317,13; 372,01). Posebno je ilustrativan porast unutar-klasterske varijance: proširenjem s prostora 1F na prostor 6F WCV raste za faktor 16 kod perovskita, 22 kod CdTe i 18 kod mono-Si HJT. Koeficijent varijacije veličine klastera jedina je metrika bez jednosmjernog trenda, što potvrđuje da opisane razlike nisu posljedica neujednačenih veličina klastera nego stvarnih razlika u geometrijskoj kvaliteti klasteriranja. Uzimajući zajedno svih pet metrika i sve tri tehnologije, prostor 1F dosljedno ostvaruje najkvalitetnija razdvajanja: najviše vrijednosti indeksa siluete i CHI-ja te najniže vrijednosti DBI-ja i WCV-a, uz prihvatljiv CV. Činjenica da rezultati za sve tri FN tehnologije daju isti zaključak posebno je važna: svaki od njih ima drugačiju spektralnu osjetljivost, pa bi bilo moguće da 1F prostor radi dobro samo za jednu tehnologiju slučajno. Budući da 1F uvijek ostvaruje najbolje rezultate kod sve tri, možemo biti sigurni da se radi o stvarnoj prednosti

pristupa, a ne o slučajnosti. Dodavanjem više značajki (2F, 3F, 6F) svaka dodana dimenzija pogoršava kvalitetu klastera. Stoga je za klasteriranje u uvjetima vedrog neba odabrana kombinacija jednodimenzijskog prostora godišnjeg ozračenjem ponderiranog $SF-a$ i $k = 4$ klastera.

Tablica 3.2 Evaluacijske metrike za četiri klastera

FN tehnologija	Prostor značajki	Analiza siluete	DBI	CHI	WCV	CV
Perovskit	1F	0,571	0,425	358,64	0,065	0,399
	2F	0,387	0,968	151,44	0,283	0,435
	3F	0,376	0,885	135,88	0,466	0,426
	6F	0,423	0,763	122,53	1,017	0,362
CdTe	1F	0,571	0,436	317,13	0,073	0,173
	2F	0,402	0,827	107,16	0,378	0,149
	3F	0,395	0,804	82,86	0,695	0,158
	6F	0,398	0,804	70,27	1,575	0,177
Mono-Si HJT	1F	0,597	0,423	372.01	0.063	0.396
	2F	0,374	0,970	128.32	0.326	0.460
	3F	0,391	0,823	112.66	0.545	0.487
	6F	0,406	0,809	105.48	1.150	0.348

Slične i prihvatljive vrijednosti CV-a za sve prostore značajki i sve tehnologije isključuju mogućnost da su razlike u ostalim metrikama posljedica neujednačenih veličina klastera, a ne stvarnih razlika u njihovoj geometrijskoj kvaliteti. Primjetno je da CdTe tehnologija ostvaruje znatno niže CV vrijednosti od preostale dvije tehnologije (0.15 nasuprot 0.35-0.49), što odražava specifičnu spektralnu osjetljivost CdTe i nešto ravnomjerniju prostornu distribuciju lokacija po klasterima za tu tehnologiju. Pseudokod za prvu fazu postupka klasifikacije prikazan je na slici 3.46.

```

ULAZ: SF vremenske serije za 79 lokacija
zasebno za svaku tehnologiju T iz {perovskiit, CdTe, mono-Si HJT}

Korak 1 – Konstrukcija matrice značajki X i standardizacija:
1F – X = [ SF_god ] (79 x 1)
2F – X = [ SF_god, SF_ljeto ] (79 x 2)
3F – X = [ SF_god, SF_ljeto, SF_zima ] (79 x 3)
6F – X = [ SF_god, SF_ljeto, SF_zima, SF proljeće, SF jesen, amplituda, varijabilnost ] (79 x 6)
standardizacija: X_i = (X_i - srednja_vrijednost) / standardna_devijacija

Korak 2 – Odabir optimalnog para (prostor, k) [brzo testiranje]:
za svaki prostor P iz { 1F, 2F, 3F, 6F }:
za k = 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8:
pokreni K-means(k) na standardiziranom X
izmjeri inerciju – heuristički vizualni filter (metoda loka)
izmjeri indeks siluete – visi – bolji
izmjeri Davies-Bouldin ind. – nizi – bolji
izmjeri Cutinski-Muraboz ind. – visi – bolji
izmjeri unutar-klust. var. – niza – bolja
izmjeri CV velicine klastera – nizi – bolji
zapiši sve metrike za par (P, k)
usporedi sve kombinacije (P, k) po svim metrikama
zaključak: prostor 1F s k = 4 konzistentno pobijedi
za sve 3 tehnologije i pri svim vrijednostima k

Korak 3 – Konačno K-means klasteriranje s odabranim param (1F, k = 4):
! do razlika od Koraka 2, ovdje koristimo n_init = 50 pokretanja
kako bismo bili sigurni da smo našli globalni, a ne lokalni optimum )
inicijalizacija: k-means++ (n_init = 50, random state = 42)
ponavljanje:
za svaku lokaciju i:
klaster(i) = argmin_j || x_i - c_j ||^2
( dodijeli lokaciju najbližem centroidu )
za svaki klaster j:
c_j = sredina svih x_i dodijeljenih klasteru j
! pomakni centroid na središte klastera )
dok god se dodijela lokacija mijenja
zadrži rješenje s najnižom inercijom od n_init = 50 pokretanja

Korak 4 – Provjera robusnosti (Wardovo hijerarhijsko klasteriranje):
pocni: svaka lokacija = zasebni klaster [ 79 klastera ]
ponavljanje:
pronadi dva klastera čije spajanje najmanje
povećava unutar-klastersku varijancu
spoji ih u jedan klaster
dok god postoji više od jednog klastera
nacrtaj dendrogram
prereži dendrogram na visini koja daje k = 4 klastera
Izračunaj ARI ( K-means, Ward )
ako ARI > 0.95 – particija je stabilna, nastavi
inače – vrati se na Korak 2

Korak 5 – Preuređenje oznaka klastera:
sortiraj klastera silazno po mean( SF_god )
Klaster 0 – lokacije s najvećim SF
Klaster 3 – lokacije s najmanjim SF

IZLAZ: svaka od 79 lokacija dobiva oznaku klastera iz { 0, 1, 2, 3 }

```

Slika 3.45 Pseudokod za prvu fazu postupka klasteriranja

4.5.2. Subklasteriranje prema utjecaju naoblake

Klasteriranje u prvoj fazi temelji se na uvjetima vedrog neba. Kako bi se obuhvatio i učinak naoblake na spektar, unutar svakog od četiri klastera provedeno je dodatno subklasteriranje na temelju dviju novih značajki koje opisuju koliko naoblaka mijenja SF u odnosu na uvjete vedrog neba. Korištene su dvije značajke: relativna godišnja razlika $SF-a$ između uvjeta vedrog neba i svih uvjeta neba, izražena u postocima, koja opisuje ukupni godišnji učinak naoblake na spektar, te razlika ljetnog srednjeg $SF-a$ između istih dvaju uvjeta, koja opisuje sezonski naglasak tog učinka. Za svaki klaster vedrog neba zasebno testiran je optimalni broj subklastera usporedbom isključivo $k = 2$ i $k = 3$, bez razmatranja većih vrijednosti. Ovaj odabir raspona je namjeran i metodološki opravdan: budući da se subklasteriranje provodi unutar već formiranoga osnovnog klastera, broj lokacija po klasteru je znatno manji nego u prvoj fazi, pa bi daljnje dijeljenje na četiri ili više subklastera rezultiralo grupama s nedovoljnim brojem članova za smislenu statističku i fizikalnu interpretaciju. U implementaciji je taj uvjet eksplicitno kodiran kao minimalni prag od tri lokacije po subklasteru - svako rješenje u kojemu bi neki subklaster sadržavao manje od tri lokacije automatski se odbacuje kao statistički nerelevantno. U svim slučajevima $k = 2$ dao je statistički zadovoljavajuće i fizikalno interpretabilne particije, a $k = 3$ je ili ostvarivao lošiji indeks siluete ili je narušavao uvjet minimalnog broja lokacija po subklasteru. Subklasteri su preuređeni po silaznom redoslijedu

relativne godišnje razlike $SF-a$: subklaster 1 označava lokacije s manjim učinkom naoblake na spektar, a subklaster 2 lokacije s većim učinkom naoblake na spektar. Konačna oznaka svake lokacije ima oblik k_sub , gdje je k indeks klastera vedrog neba, a sub indeks subklastera. Primjerice, oznaka 2_1 označava klaster 2, subklaster 1, tj. lokacije s nižim SF-om vedrog neba i izraženijim učinkom naoblake. Pseudokod za prvu fazu postupka klasifikacije prikazan je na slici 3.47

```

IZLAZ: za svaku lokaciju dvije cloud-impact značajke:
f 1 = ( SF god,svl - SF god,vedro ) / SF god,vedro × 100 [%]
f 2 = SF tjeto,vedro - SF tjeto,svl

za svaki klaster c iz { 0, 1, 2, 3 }:
Korak 1 - Ekstrakcija i standardizacija cloud značajki:
uzmi samo lokacije koje pripadaju klasteru c
standardiziraj f_1 i f_2 z-score

Korak 2 - Odabir optimalnog broja subklastera k sub:
za k sub iz { 2, 3 }:
pokreni K-means( k sub ) na standardiziranom { f_1, f_2 }
izvjeri indeks siluete
provjeri: svaki subklaster mora imati najmanje 3 lokacije
[ uvjet fizikalne interpretabilnosti ]
odaberi k_sub s višim indeksom siluete
zaključak: k_sub = 2 optimalno za sve klasterne
i sve tri tehnologije

Korak 3 - K-means subklasteriranje ( k_sub = 2 ):
pokreni K-means( k_sub = 2 ) na standardiziranom { f_1, f_2 }
( n_init = 30, random_state = 42 )

Korak 4 - Preuređenje subklastera:
subklaster 0 = nizi mean( f_1 ) manji utjecaj naoblake
subklaster 1 = visji mean( f_1 ) veći utjecaj naoblake

Korak 5 - Konačna hijerarhijska oznaka:
oznaka( lokacija ) = str( klaster ) + " " + str( subklaster )
primjer: "2 1" = klaster 2, subklaster 1
[ lokacije s nižim SF-om vedrog neba i
izraženijim učinkom naoblake ]

IZLAZ: svaka od 79 lokacija dobiva hijerarhijsku oznaku
ukupno do 8 spektralnih zona po FN tehnologiji
pohrana: ClearSky Cluster, SubCluster, Hierarchical Label → .csv / .xlsx

```

Slika 3.46 Pseudokod za drugu fazu postupka klasteriranja

4.5.3 Pregled klastera

U ovom poglavlju provedena je spektralno utemeljena klasifikacija 79 europskih lokacija na temelju faktora spektralne korekcije za tri reprezentativne FN tehnologije: perovskit, CdTe te mono-Si HJT. Klasifikacija je provedena dvofaznim algoritmom klasteriranja koji u prvoj fazi grupira lokacije prema godišnjem ozračenjem ponderiranom SF-u u uvjetima vedrog neba, a u drugoj fazi unutar svakog klastera provodi subklasteriranje prema utjecaju naoblake na spektar.

Na razini prikaza rezultata, klasterska struktura za tri reprezentativne tehnologije dodatno je ilustrirana. Na slikama 3.47, 3.50 i 3.53 prikazane su karte Europe na kojima su lokacije koje pripadaju istom klasteru označene istom bojom, čime se vizualizira prostorna distribucija spektralno sličnih zona. Na slikama 3.48, 3.51 i 3.54 dani su mjesečni profili $SF-a$ za svaki klaster, dok slike 3.49, 3.52 i 3.55 prikazuju histograme APE razdiobe unutar pojedinih klastera. Ovi histogrami pružaju dodatnu i neovisnu potvrdu kvalitete provedene klasterizacije. Budući da perovskit i CdTe kao tankoslojne tehnologije pokazuju snažnu pozitivnu korelaciju s APE-om - tj. viši APE odgovara spektralno povoljnijim uvjetima i višem SF-u - očekuje se da klasteri s višim SF-om vedrog neba budu karakterizirani i višim vrijednostima APE-a. Histogrami to i

potvrđuju: klaster 1 pokazuje najveće vrijednosti *APE-a*, koje potom postupno opadaju prema klasteru 4 koji bilježi najniže vrijednosti *APE-a*, pri čemu su razdiobe pojedinih klastera dobro razdvojene s minimalnim preklapanjem. Ovaj kontinuiran pad *APE-a* od klastera 1 prema klasteru 4 neovisna je potvrda da klasterizacija nije proizvoljno grupirala lokacije, već je identificirala fizikalno smislene spektralne zone koje odražavaju stvarne razlike u atmosferskim uvjetima i spektralnom sastavu sunčevog zračenja.

Za mono-Si HJT situacija je zrcalno obrnuta, što je u potpunom skladu s njezinom negativnom korelacijom s *APE* vrijednosti: viši *APE* odgovara spektralno nepovoljnijim uvjetima za kristalni silicij jer intenzivno direktno sunčevo zračenje s visokom *APE* vrijednosti sadrži relativno manji udio NIR dijela spektra na koji je kristalni silicij osjetljiv. Sukladno tome, histogrami za mono-Si HJT pokazuju da klaster 1 bilježi najniže vrijednosti *APE-a*, koje postupno rastu prema klasteru 4 s najvišim *APE*-om, što je točno suprotno obrascu tankoslojnih tehnologija. Ova zrcalna simetrija *APE* razdioba između tankoslojnih i kristalnih silicijskih tehnologija snažan je argument u prilog spektralnoj komplementarnosti dviju klasa FN tehnologija i dodatno potvrđuje robustnost i fizikalnu utemeljenost provedene klasterizacije. Konačno, slika 3.54 sažima srednje mjesečne vrijednosti *SF-a* za sva klasteriranja, jasno pokazujući da su granice između klastera dobro definirane i da dobivena klasifikacija spektralno konzistentno razdvaja lokacije s različitim uvjetima. U Prilogu A u tablici A.7 nalaze se i detaljni podaci o subklasterima.

Za obje tankoslojne tehnologije rezultati klasteriranja u uvjetima vedrog neba otkrivaju iznimno izražen gradijent duž geografske širine koji je fizikalno konzistentan s poznatim atmosferskim uzrocima spektralnih razlika. Klaster 1, koji odgovara lokacijama s najvišim godišnjim *SF-om* vedrog neba i najpovoljnijim spektralnim uvjetima za tankoslojne tehnologije, obuhvaća gotovo isključivo mediteranske i južnoeuropske lokacije smještene ispod 44° sjeverne geografske širine. Za perovskit u ovaj klaster ulaze Athens, Katerini, Kavala, Marseille, Nicosia, Palermo, Plovdiv, Seville, Split, Thessaloniki, Thira i Valletta u subklasteru 1 te Barcelona, Bucharest, Burgas, Constanta, Koper, Limassol, Naples, Osijek, Rijeka, Roma, Valencia, Varna i Zagreb u subklasteru 1, uz vrlo sličan raspored i za CdTe. Ove lokacije karakteriziraju Köppen-Geiger klimatski tipovi Csa, BSh i BSk s niskim aerosolnim opterećenjem i visokim udjelom ozračenja bogatog kratkovalnim komponentama koje pogoduju tankoslojnim tehnologijama osjetljivim na plavi dio spektra. Subklasteriranje unutar klastera 1 razdvaja klasične mediteranske lokacije s vrlo stabilnim i konzistentnim spektralnim uvjetima, poput Atene, Nicosia, Vallette i Palerma koji dobivaju subklaster 1, od rubnih mediteranskih i jugoistočnoeuropskih lokacija poput

Bucharest, Burgas, Constanta, Osijek i Zagreb koje unatoč visokom *SF-u* vedrog neba pokazuju izraženiji sezonski kontrast zbog povremenih intenzivnih epizoda naoblachenja i ljetnih grmljavinskih sustava te stoga dobivaju subklaster 2.

Klaster 1 za obje tankoslojne tehnologije obuhvaća prijelaznu zonu lokacija pretežno smještenih između 38° i 50° sjeverne geografske širine s umjerenim *SF-om* vedrog neba. Za perovskit subklaster 1 dobivaju kontinentalne lokacije poput Budimpešte, Bratislave, Debrecena, Ljubljane, Madrida, Milana, Nantesa, Nitre, Szegedq, Udinq, Wroclava i Züricha, dok subklaster 2 dobivaju lokacije pod atlantskim utjecajem ili smještene u alpskom pojasu: Bilbao, Brno, Graz, Prag, Strasbourg, Stuttgart i Wien. Za CdTe je raspored sličan uz manju razliku da klaster 1 uključuje i Lisabon i Porto koji su za perovskit u klasteru 0, što odražava nešto drugačiju spektralnu osjetljivost dviju tankoslojnih tehnologije.

Klaster 3 predstavlja sjevernu prijelaznu zonu lokacija između otprilike 48° i 60° sjeverne geografske širine. Za perovskit subklaster 1 unutar klastera 2 dobivaju kontinentalnije lokacije poput Berlina, Berna, Helsinkija, Luxembourga, Sofije, Tallinna i Vilnusa, dok subklaster 1 dobivaju atlantski izložene lokacije: Amsterdam, Bruxelles, Cologne, Eindhoven i Paris. Zanimljivo je da Helsinki i Tallinn, unatoč geografskim širinama od 60° i 59°, završavaju u klasteru 3 umjesto u klasteru 4, što se može pripisati relativno niskoj taložnoj vodnoj pari skandinavske kontinentalne klime koja umanjuje atmosfersku apsorpciju kratkovalnoga sunčevog zračenja i time poboljšava *SF* za tankoslojne tehnologije.

Klaster 3, s najnižim *SF-om* vedrog neba za tankoslojne tehnologije, obuhvaća pretežno sjevernoeuropske atlantske lokacije iznad 51° sjeverne geografske širine: Bergen, Stockholm, Oslo, Esbjerg, Riga, Gothenburg, Tallinn, Hamburg, London, Manchester i Copenhagen. Dominiraju klimatski tipovi Dfb i Cfb s visokom masom zraka, pojačanom atmosferskom raspršenosti i dominacijom difuznog zračenja siromašnog kratkovnim komponentama. Subklasteriranje unutar klastera 4 pokazuje da skandinavske lokacije poput Bergena, Osla i Stockholma dobivaju subklaster 1, dok najizoloženije atlantske lokacije poput Dublina, Manchestera i Birminghama dobivaju subklaster 2 zbog iznimno varijabilnog atlantskog naoblachenja koje donosi veću spektralnu razliku između uvjeta vedrog neba i stvarnih uvjeta, posebno u proljetnom i jesenskom periodu.

Mono-Si HJT tehnologija pokazuje fundamentalno drugačiji i u određenom smislu obrnut raspored klastera u odnosu na tankoslojne tehnologije, što je izravna posljedica njezine šire spektralne osjetljivosti koja obuhvaća crveni i bliski infracrveni dio spektra. Dok tankoslojne tehnologije bilježe najviši *SF* u mediteranskom pojasu, kod mono-Si HJT situacija je suprotna:

klaster 1 obuhvaća sjevernoatlantske lokacije Bergen, Cork, Hamburg, London i Stockholm kojima difuzno i oblačno zračenje na visokim geografskim širinama pogoduje jer sadrži relativno veći udio crvenog i bliskog infracrvenog dijela spektra. Subklaster 1 unutar klastera 1 dobivaju Bergen, Cork, Hamburg, London i Stockholm, dok subklaster 2 dobivaju Birmingham, Dublin i Manchester kao najizoloženije atlantske lokacije s najvećom varijabilnošću naoblačenja.

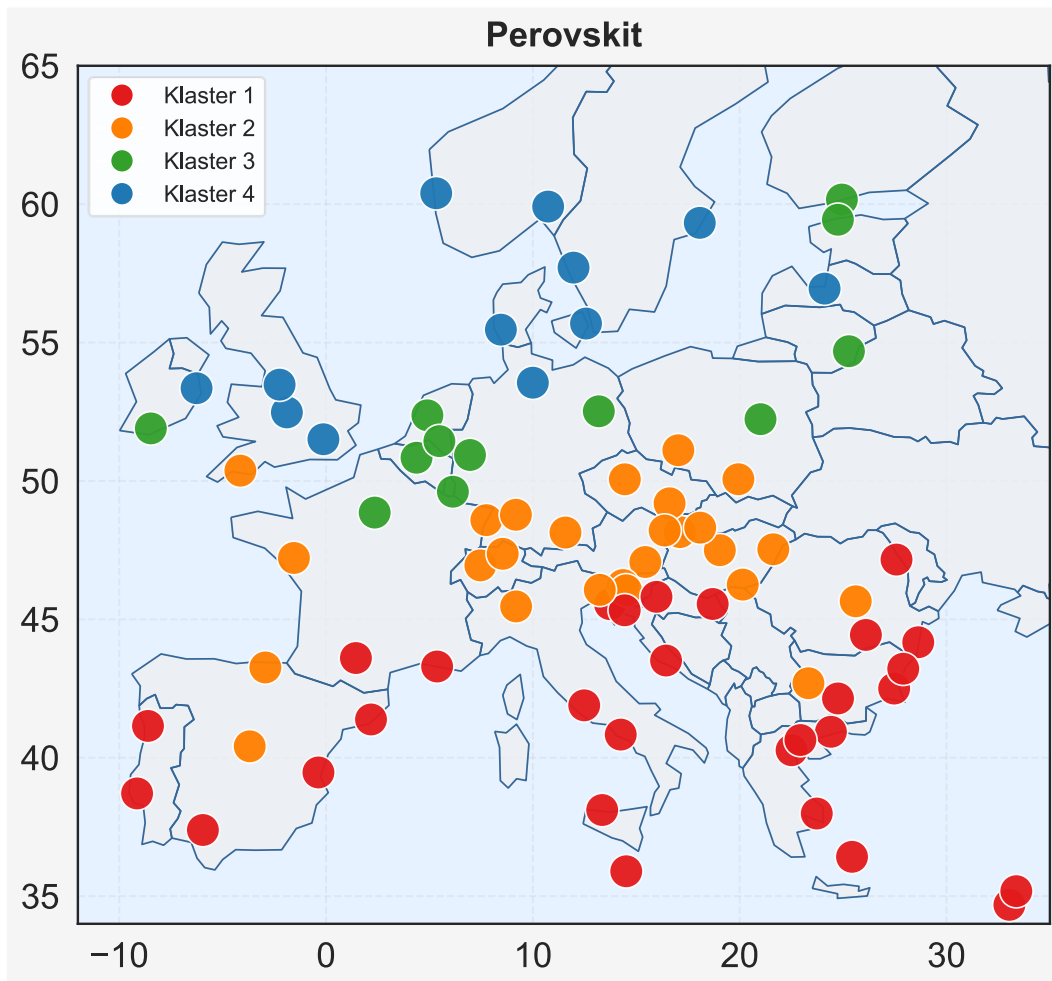
Klaster 2 za mono-Si HJT je obuhvaća široki pojas srednje i sjeverne Europe. Subklaster 1 dobivaju kontinentalne lokacije s manjim utjecajem naoblake poput Berlina, Debrecena, Göteborga, Milana, Nitre, Osla, Rige, Szegeda, Udina, Vilniusa, i Wroclava, dok subklaster 2 dobivaju atlantske i prialpske lokacije: Amsterdam, Bruxelles, Cologne, Kopenhagen, Eindhoven, Esbjerg, Graz, Helsinki, Nantes, Paris, Plymouth, Tallinn, Wien i Zürich.

Klaster 3 za mono-Si HJT obuhvaća veliku skupinu lokacija u širom pojasu između mediterana i srednje Europe. Subklaster 1 dobivaju lokacije s konzistentnim spektralnim uvjetima poput Atene, Barcelone, Brašova, Bratislave, Bukurešta, Burgasa, Konstante, Katerinije, Kavale, Marseille, Nikozije, Osijeka, Palerma, Plovdiva, Rijeke, Rima, Sofije, Splita, Soluna, Thire, Toulousea, Valencije, Vallette, Varne i Zagreba, dok subklaster 2 dobivaju lokacije s izraženijim sezonskim kontrastom: Bern, Bilbao, Brno, Graz, Kranj, Limassol, Luxembourg, München, Napulj, Prag, Strasbourg, Stuttgart, Wien i Zürich.

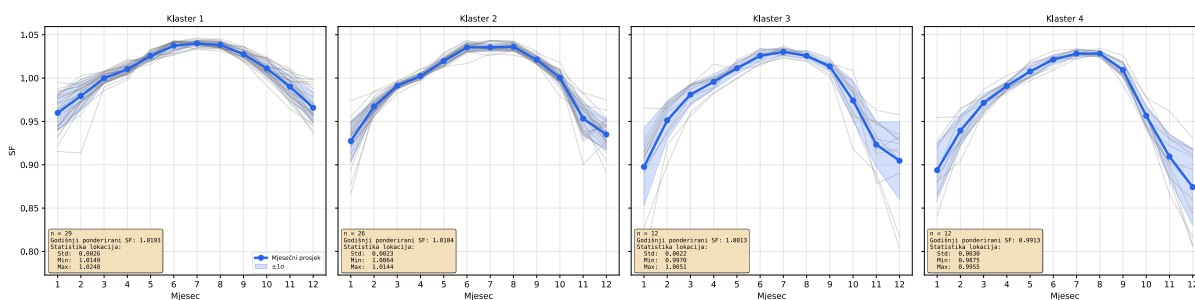
Klaster 4 za mono-Si HJT je najmanji i obuhvaća samo četiri iberijske lokacije - Madrid, Seville, Lisabon i Porto - koje imaju najintenzivnije direktno sunčevo zračenje u Europi s relativno manjim udjelom crvenog i bliskog infracrvenog dijela spektra, što je spektralno najmanje povoljno za kristalni silicij. Subklaster 1 dobivaju kontinentalniji Madrid i Seville, dok subklaster 2 dobivaju atlantski izloženiji Lisabon i Porto zbog veće varijabilnosti naoblačenja uzrokovane atlantskim vremenskim uvjetima.

Ključni nalaz je da tankoslojne i kristalne silicijske tehnologije pokazuju suprotne geografske obrasce spektralnog opterećenja: što je lokacija spektralno povoljnija za perovskit i CdTe, to je spektralno manje povoljna za mono-Si HJT, i obratno. Pritom valja naglasiti da perovskit i CdTe, iako obje tankoslojne tehnologije, nisu spektralno identične - CdTe pokazuje izraženu osjetljivost na taložnu vodenu paru zbog položaja svog apsorpcijskog ruba u spektralnom području na koje vodena para značajno utječe, pa na lokacijama s velikim sezonskim ili međugodišnjim varijacijama taložne vodene pare CdTe može pokazivati zamjetna odstupanja u klsterskoj dodjeli u odnosu na perovskit. To se očituje u određenim razlikama u rasporedu lokacija između klastera za ove dvije tehnologije, posebno za priobalne i atlantske lokacije te

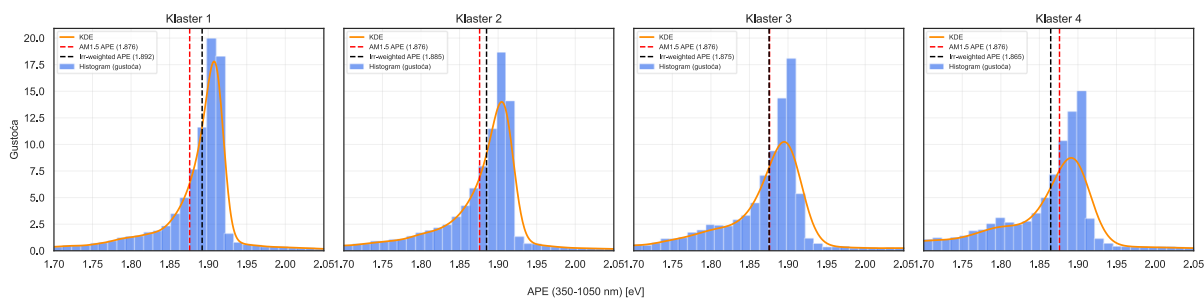
lokacije na rubovima mediteranskog i kontinentalnog klimatskog pojasa gdje su varijacije taložne vodene pare najveće. Ovaj rezultat ima izravne praktične implikacije za odabir FN tehnologije ovisno o lokaciji. Dobivene spektralne zone mogu poslužiti kao referentni okvir za preciznije modeliranje prinosa FN sustava u europskom prostoru, pri čemu svaka tehnologija ima vlastiti skup klastera koji odražava njezinu specifičnu spektralnu osjetljivost.



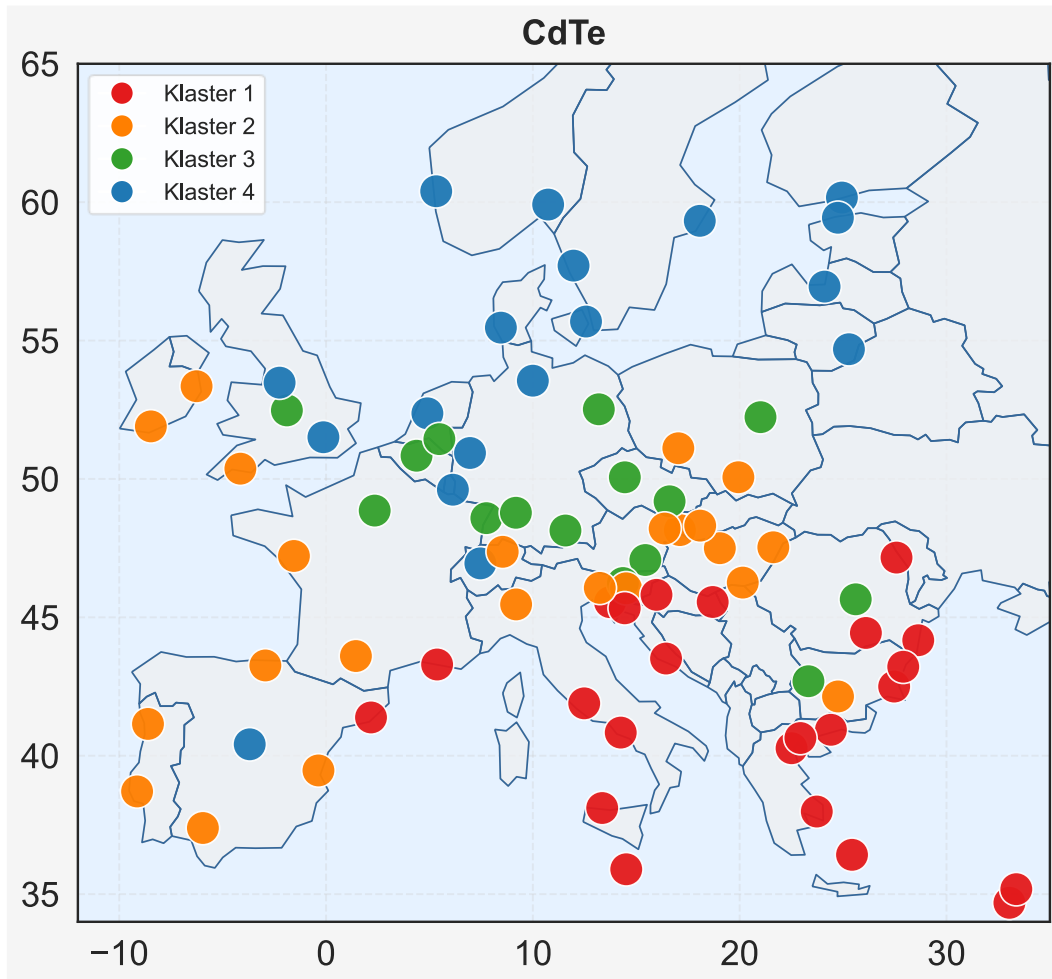
Slika 3.47 Klasteriranje za vedro nebo za perovskit.



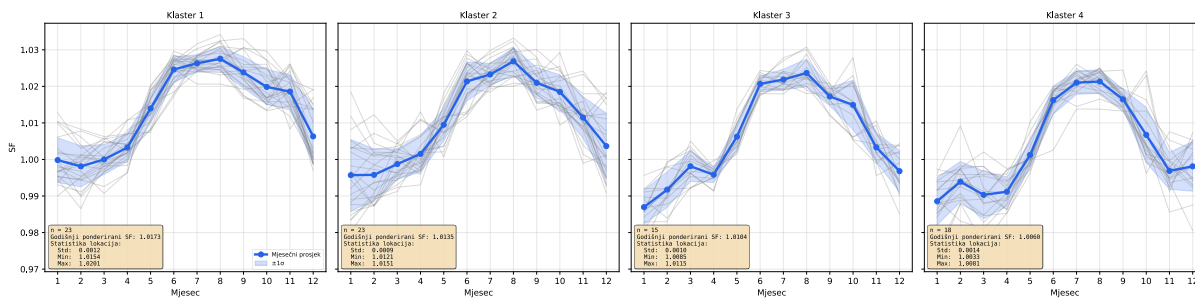
Slika 3.48 Mjesečne vrijednosti SF-a za klustere za perovskit.



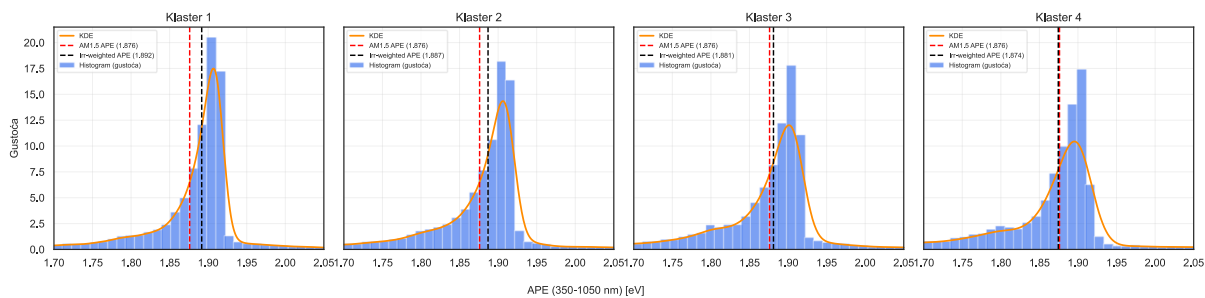
Slika 3.49 Histogram APE razdiobe za klustere za perovskit.



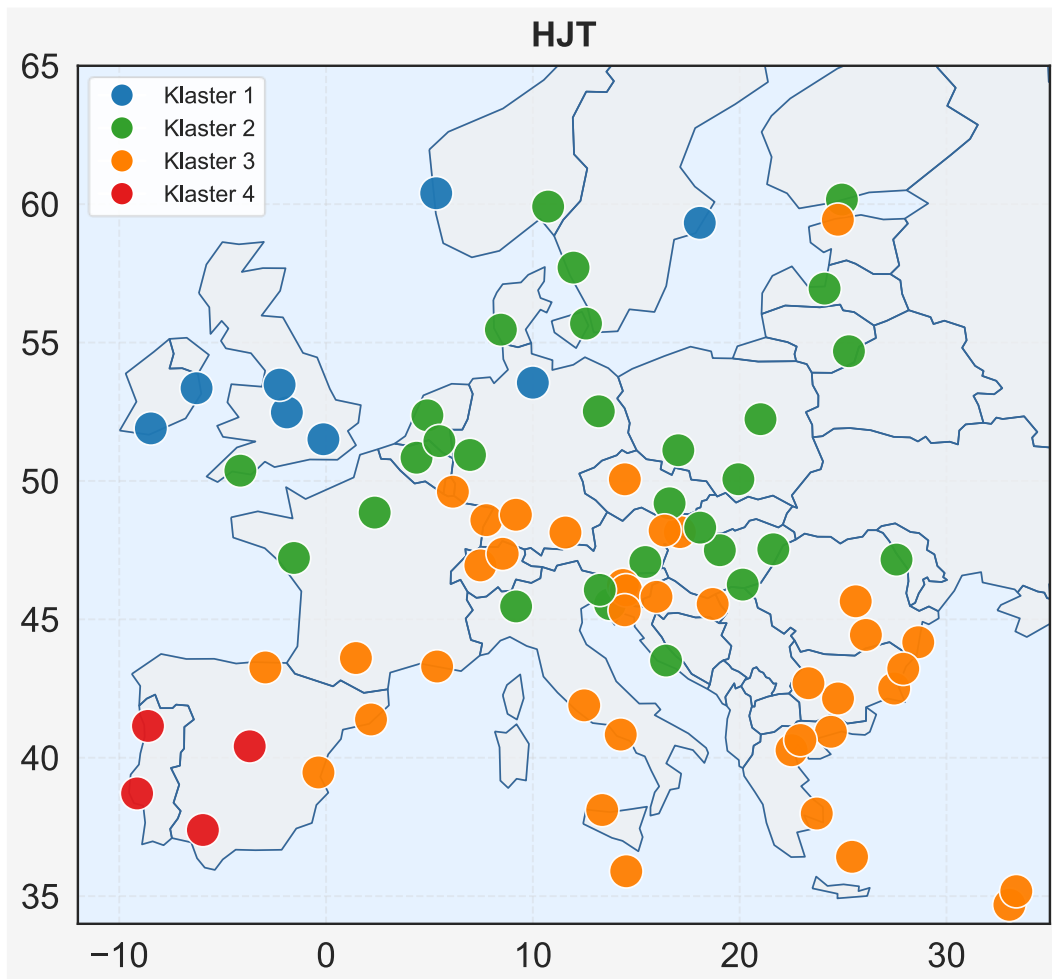
Slika 3.50 Klasteriranje za vedro nebo za CdTe.



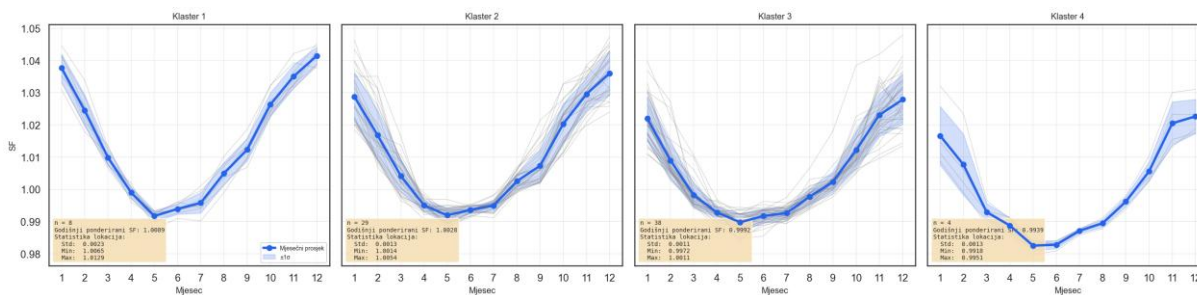
Slika 3.51 Mjesečne vrijednosti SF-a za klaster za CdTe.



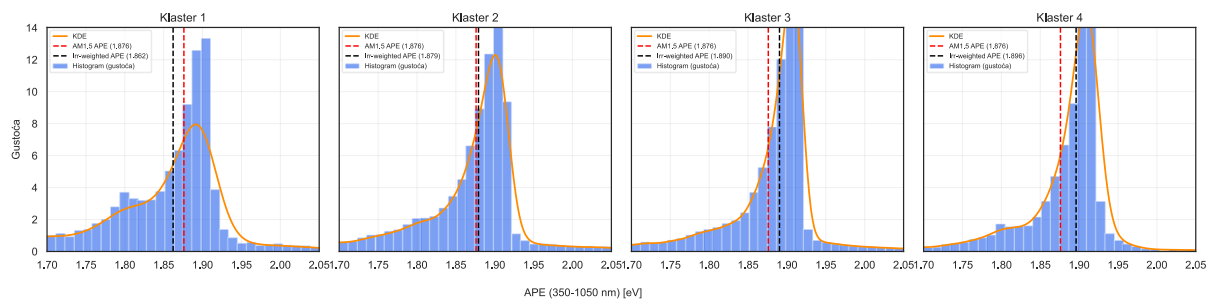
Slika 3.52 Histogram APE razdiobe za klaster za CdTe.



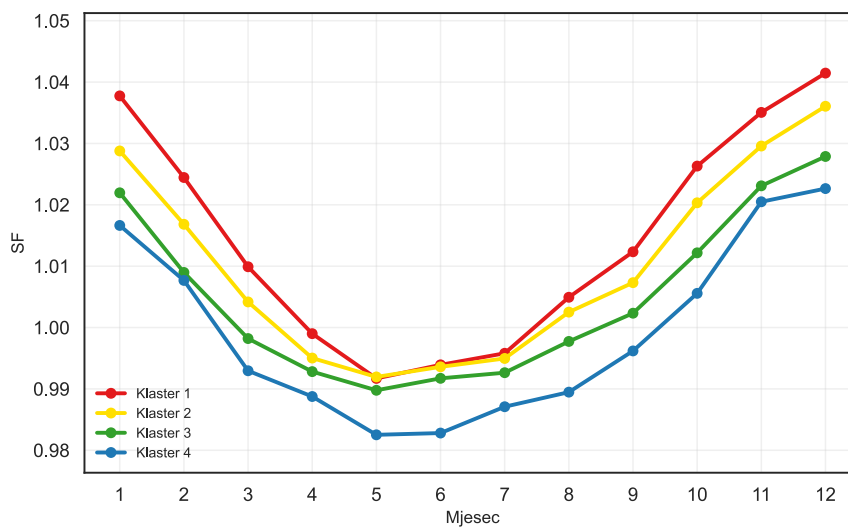
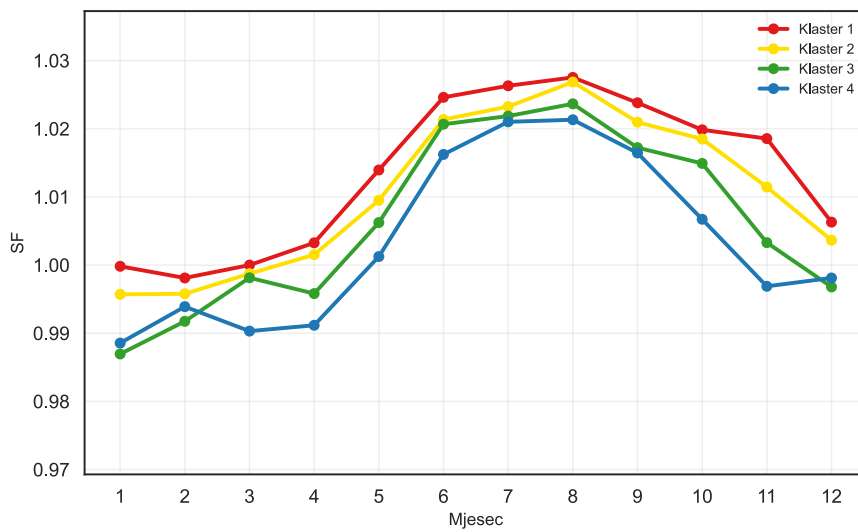
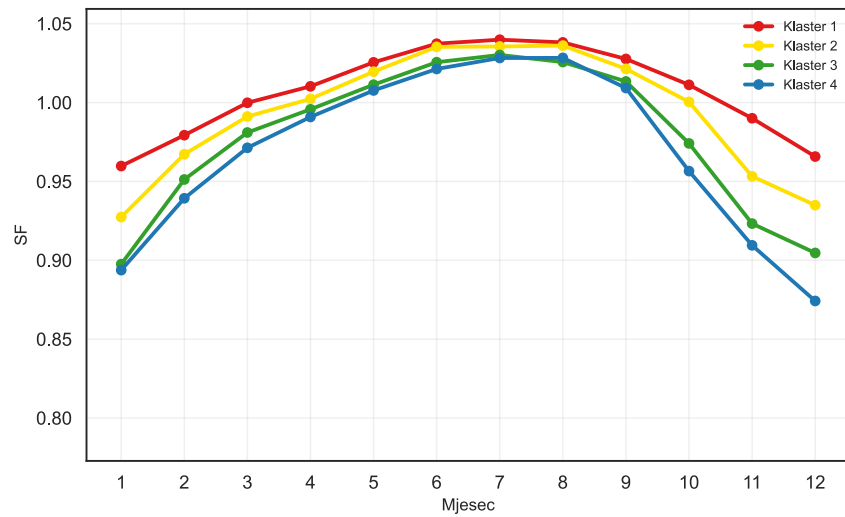
Slika 3.53 Klasteriranje za vedro nebo za mono-Si HJT.



Slika 3.54 Mjesečne vrijednosti SF-a za klustere za mono-Si HJT.



Slika 3.55 Histogram APE razdiobe za klustere za mono-Si HJT.



Slika 3.56 Prosječne mjesečne vrijednosti SF-a za klasterne za perovskit (gore), CdTe (sredina) i mono-Si HJT (dolje).

4. RAZVOJ I VALIDACIJA MODELA SPEKTRALNE KOREKCIJE S GLOBALNO DOSTUPNIM ATMOSFERSKIM VARIJABLAMA

4.1. Opći pristup modeliranju faktora spektralne korekcije

Razvoj modela spektralne korekcije u ovoj doktorskoj disertaciji temelji se na dvostupanjskom hibridnom pristupu, koji prema saznanjima autora do sada nije primijenjen na ovu problematiku. U prvom koraku napravljena je neparametarska regresija metodom slučajne šume (engl. *random forest* - *RF*) za identifikaciju i rangiranje ključnih atmosferskih značajki (engl. *predictors*). U drugom koraku korištena je klasična parametarska linearna regresija metodom najmanjih kvadrata (engl. *ordinary least squares* - *OLS*) za određivanje koeficijenata analitičkih jednadžbi koje povezuju faktor spektralne korekcije *SF* s odabranim atmosferskim varijablama. Ovaj pristup omogućuje procjenu spektralnog utjecaja na rad FN sustava bez potrebe za izravnim mjerenjima spektra Sunčeva zračenja, što predstavlja praktično rješenje primjenjivo na velikom broju lokacija. Metodologija razvoja modela, prikazana na slici 4.1 strukturirana je kroz tri glavne faze:

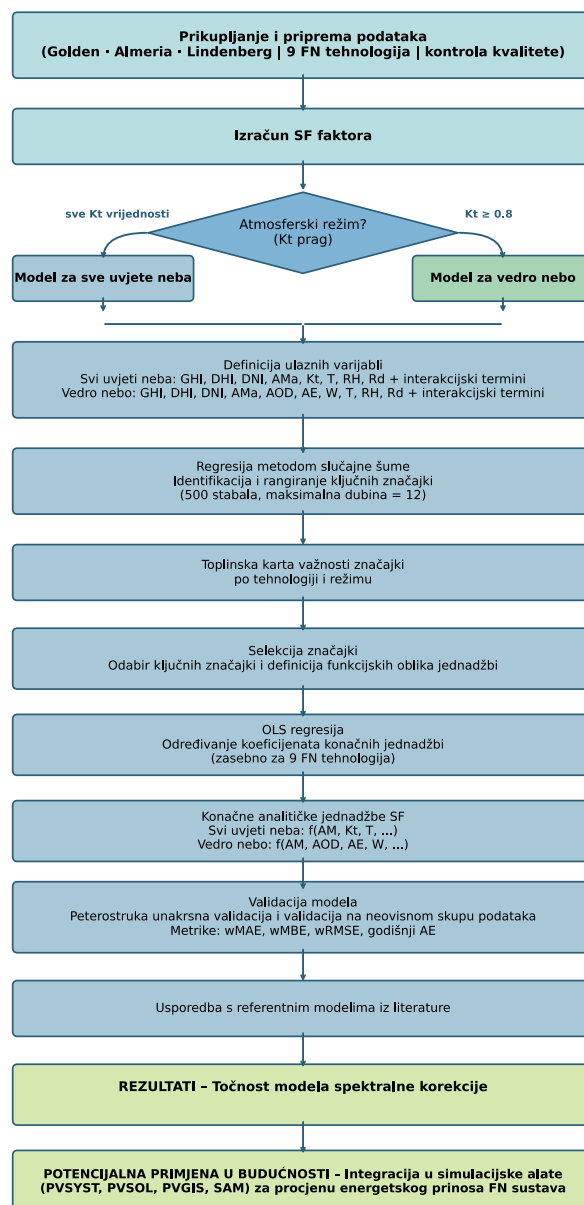
1. Prikupljanje i priprema podataka: obuhvaća odabir relevantnih mjernih lokacija, prikupljanje spektralnih i atmosferskih podataka te vremensku sinkronizaciju i kontrolu kvalitete.
2. Razvoj regresijskih modela: primjena navedenog dvostupanjskog hibridnog pristupa zasebno za svaku od devet FN tehnologija i za svaki od dva atmosferska režima (svi uvjeti neba i vedro nebo).
3. Validacija i usporedba: provjera točnosti razvijenih modela kroz statističke metrike i usporedbu s postojećim modelima iz literature.

U konačnici su razvijene dvije verzije modela spektralne korekcije, svaka prilagođena specifičnom atmosferskom režimu:

1. Model za sve uvjete neba (engl. *all-sky model*): koristi osnovne meteorološke varijable dostupne na gotovo svim mjernim lokacijama (masa zraka, indeks vedrine neba, temperatura, relativna vlažnost) i primjenjiv je za sve vremenske uvjete tijekom cijele godine.

2. Model za vedro nebo (engl. *clear-sky model*): namijenjen isključivo periodima vedrog neba te uz masu zraka koristi i specijalizirane varijable (optička dubina aerosola, Ångströmov eksponent, taložna vodena para), čime se postiže povećana preciznost u uvjetima kada su navedene varijable dostupne.

Oba modela razvijena su i validirana zasebno za svaku od devet FN tehnologija (a-Si, CdTe, perovskit, mono-Si PERC, mono-Si PERT, poli-Si Al-BSF, mono-Si HJT, CIGS i CZTSSe) na tri geografski i klimatski različite lokacije. Ovaj odabir lokacija omogućuje procjenu robusnosti i sezonske varijabilnosti modela kroz raznolike atmosferske uvjete, kao i identifikaciju optimalnog pristupa za različite scenarije primjene.



Slika 4.1 Metodološki okvir razvoja modela spektralne korekcije.

4.2. Geografske i klimatske značajke mjernih lokacija

Precizna spektrometrijska mjerenja ključna su za modeliranje faktora spektralne korekcije, ali njihova ograničena dostupnost predstavlja veliki izazov u istraživanju spektralnih utjecaja na rad FN modula. Takva visokokvalitetna mjerenja rijetka su zbog tehničke složenosti i visoke cijene opreme, pa su koncentrirana u malom broju specijaliziranih centara. Još je teže pronaći lokacije na kojima su precizna spektralna mjerenja uparena s mjerenjima taložne vodene pare, optičke dubine aerosola i standardnim meteorološkim podacima (ozračenjem, tlakom, temperaturom, relativnom vlažnošću), što je bilo nužno za ovo istraživanje. Pristup takvim skupovima dodatno je otežan politikama ograničenja dijeljenja podataka te činjenicom da su često dostupni isključivo kroz specifična istraživačka partnerstva. Zbog svega navedenog, odabir lokacija za ovo istraživanje je pažljivo koncipiran tako da zadovolji dva ključna kriterija:

1. dostupnost kompletnog skupa potrebnih mjernih podataka visoke kvalitete
2. geografsku i klimatsku raznolikost koja omogućuje primjenjivost modela u različitim spektralnim uvjetima.

U konačnici, odabrane su tri lokacije koje predstavljaju različite klimatske režime: suhu mediteransku klimu (Almeria, Španjolska), polusušnu planinsko-kontinentalnu klimu (Golden, Colorado, SAD) te umjerenu oceansku prijelaznu klimu (Lindenberg, Brandenburg, Njemačka). Uz klimatske značajke poput učestalosti oblačnih dana, količine taložne vodene pare te vrste i koncentracije aerosola, ključnu ulogu imaju i geografska širina te nadmorska visina, jer upravo one zajedno određuju raspon vrijednosti mase zraka tijekom godine, a po svim tim obilježjima ove se tri lokacije međusobno jasno razlikuju. Ova raznolikost omogućuje temeljitu provjeru primjenjivosti razvijenog modela u različitim geografskim i klimatskim regijama, a u nastavku je dan detaljan opis svake od odabranih lokacija.

4.2.1. Golden, Colorado, SAD

Lokacija Golden nalazi se u američkoj saveznoj državi Colorado, u podnožju Stjenovitih planina (engl. *Rocky Mountains*), na nadmorskoj visini od 1828 metara i prikazana je na slici 4.2. Geografske koordinate mjerne postaje su 39,74° N i 105,18° W. Prema Köppen-Geigerovoj klasifikaciji, Golden pripada polusušnoj klimi (BSk) s izraženim kontinentalnim obilježjima, uz utjecaj planinske klime zbog visoke nadmorske visine, karakterističnoj za planinsko predgorje s relativno niskim godišnjim količinama oborina (prosječno oko 400 mm godišnje) i velikim dnevnim temperaturnim amplitudama [155].

Mjerenja su provedena u NLR-ovom Laboratoriju za istraživanje Sunčeva zračenja (engl. *Solar Radiation Research Laboratory - SRRL*), vodećoj svjetskoj postaji za mjerenje Sunčeva zračenja. Od 1984. SRRL kontinuirano prikuplja visokokvalitetne podatke o komponentama Sunčeva zračenja, atmosferskim uvjetima i radu FN sustava, te služi kao referentna postaja za validaciju instrumenata i modela [78]. Podaci su dobiveni od Arona Habte, istraživača koji je zadužen za mjerenja vezana za Sunčevo zračenje u NLR-u (osobna komunikacija, listopad 2025.).

Laboratorij je smješten na visoravni South Table Mountain s neometanim horizontom, što osigurava izvrsnu solarno-geometrijsku ekspoziciju tijekom cijele godine. Visoka nadmorska visina rezultira nižom apsolutnom masom zraka i manjim sadržajem taložne vodene pare u odnosu na lokacije na razini mora, što zamjetno utječe na spektralnu raspodjelu Sunčeva zračenja. Istodobno, relativna blizina urbanog područja Denvera uvjetuje promjenjivost u koncentraciji aerosola, dok je klima obilježena visokim udjelom vedrih dana.



Slika 4.2 Golden, Colorado, SAD.

4.2.2. Almeria, Španjolska

Lokacija Almeria, prikazana na slici 4.3, smještena je u pustinji Tabernas u jugoistočnoj Španjolskoj, jednoj od najsušnijih regija Europe. Geografske koordinate mjerne postaje su $37,10^{\circ}$ N i $2,36^{\circ}$ W, na nadmorskoj visini od 504 metara. Klima pripada kategoriji vruće polusušne do pustinjske klime (BWh/BSh), s godišnjim oborinama manjim od 250 mm i prosječnom godišnjom temperaturom višom od 18° C [156].

Mjerenja za ovu lokaciju provedena su u PSA istraživačkom centru (španj. *Platforma Solar de Almería*), najvećem europskom centru za istraživanje koncentrirajućih solarnih elektrana. PSA je osnovan 1981. i djeluje u sklopu španjolskog CIEMAT-a, uz sudjelovanje njemačkog DLR-

a, koji zajedno održavaju ovu mjernu postaju osiguravajući visoke standarde kalibracije instrumenata i kontrole kvalitete podataka [157]. Mjerenja su dobivena od Stefana Wilberta, voditelja istraživačke grupe koja se bavi mjerenjem Sunčeva zračenja na PSA (osobna komunikacija, siječanj 2026.).

Pustinjski karakter lokacije rezultira iznimno visokim vrijednostima ukupnog ozračenja, niskim sadržajem atmosferske vlage i relativno visokim vrijednostima optičke dubine aerosola zbog prisutnosti mineralnih (pustinjskih) aerosola. Takvi uvjeti stvaraju spektralne karakteristike tipične za suha i vruća klimatska područja južnog Mediterana i sjeverne Afrike, što ovu lokaciju čini posebno reprezentativnom za validaciju modela u suhim klimatskim režimima.



Slika 4.3 Almeria, Španjolska.

4.2.3. Lindenberg, Njemačka

Lokacija Lindenberg, predstavljena slikom 4.4, smještena je u sjeveroistočnoj Njemačkoj, u saveznoj državi Brandenburg, oko 65 km jugoistočno od Berlina. Geografske koordinate mjerne postaje su $52,21^{\circ}$ N i $14,12^{\circ}$ E, na nadmorskoj visini od 114 metara. Prema Köppen-Geigerovoj klasifikaciji, regija pripada umjerenj oceanškoj klimi (Cfb) s elementima prijelaza prema kontinentalnoj klimi, karakteriziranoj umjerenim temperaturama tijekom cijele godine i relativno ravnomjernom raspodjelom oborina (oko 550 mm godišnje). Ima znatno niži udio sunčanih dana u usporedbi s Almeriom i Goldenom, s čestom pokrivenošću oblacima [158].

Mjerenja su provedena u opservatoriju MOL-RAO (njem. *Meteorologisches Observatorium Lindenberg - Richard-Aßmann-Observatorium*), koji je dio Njemačke meteorološke službe (njem. *Deutscher Wetterdienst - DWD*). Osnovan 1905., MOL-RAO je jedan od najznačajnijih atmosferskih opservatorija u Europi i služi kao referentna stanica za validaciju satelitskih mjerenja te numeričkih atmosferskih i klimatskih modela [79,159]. Mjerenja su dobivena od

Lionela Dopplera, istraživača zaduženog za mjerenja Sunčeva zračenja na ovoj lokaciji (osebna komunikacija, listopad 2025.).

Klimatske značajke Lindenberga znatno se razlikuju od prethodne dvije lokacije. Umjeren klima s čestom naoblakom i viša geografska širina rezultira nižim prosječnim vrijednostima ukupnog ozračenja, višom prosječnom vrijednošću mase zraka i nižom prosječnom razinom indeksa vedrine neba. Relativno visok sadržaj atmosfertske vlage i učestala pojava oblaka čine ovu lokaciju posebno važnom za validaciju modela za sve uvjete neba te ispitivanje točnosti u uvjetima promjenjive naoblake, karakterističnim za velike dijelove srednje i sjeverne Europe. Sažetak geografskih, klimatskih i spektralnih značajki odabranih lokacija predstavljen je u tablici 4.1.



Slika 4.4 Lindenberg, Njemačka.

Tablica 4.1 Sažetak geografskih, klimatskih i spektralnih značajki odabranih lokacija.

Lokacija	Golden, Colorado, SAD	Almeria, Španjolska	Lindenberg, Njemačka
Geografska širina	39,74° N	37,10° N	52,21° N
Geografska dužina	105,18° W	2,36° W	14,12° E
Nadmorska visina	1828 m	504 m	114 m
Klimatska zona (Köppen-Geiger)	BSk	BWh/BSh	Cfb
Godišnje oborine	~400 mm	~250 mm	~550 mm
Dominantni spektralni uvjeti	Visoka nadmorska visina, nizak sadržaj vlage, promjenjiv <i>AOD</i> (utjecaj urbanog područja); vedro nebo s niskim <i>AM</i> i <i>W</i>	Nizak sadržaj vlage, visok <i>AOD</i> (pustinjski aerosoli); vedro nebo s pojačanim kratkovalnim dijelom spektra	Visok sadržaj vlage, česta naoblaka, niži <i>AOD</i> ; all-sky uvjeti s visokim udjelom raspršenog zračenja
Istraživački centar	NLR SRRL	PSA (CIEMAT/DLR)	MOL-RAO (DWD)

4.3. Kontrola kvalitete i predobrada mjerenja

Razvoj robusnog modela spektralne korekcije uvelike ovisi o kvaliteti ulaznih podataka. Sirova mjerenja podložna su instrumentalnim pogreškama, kalibracijskim pomacima, kvarovima opreme i šumu, pa je nužna primjena rigoroznih protokola kontrole kvalitete (engl. *quality control* - *QC*). Proces transformacije sirovih podataka u finalni skup za modeliranje uključuje provjeru fizikalne konzistentnosti, detekciju odstupajućih vrijednosti, vremensko usklađivanje mjerenja s različitih instrumenata, unakrsnu validaciju i konačnu selekciju podataka.

Iako su na sve tri lokacije promatrane iste varijable, specifičnosti svake mjerne postaje (instrumentacija, format i vremenska rezolucija podataka, prethodna obrada) zahtijevale su prilagođene postupke. Neki su skupovi već prošli osnovnu kontrolu kvalitete, dok su drugi bili u potpuno sirovom obliku, što je nametnulo potrebu za jedinstvenom metodologijom koja homogenizira podatke neovisno o početnom stupnju obrade. U nastavku se stoga detaljno opisuju korišteni kriteriji kvalitete i početni odabir ulaznih varijabli za model spektralne korekcije. Polazište je bio cjelokupan skup dostupnih mjerenih veličina na sve tri lokacije, pri čemu su u razmatranje uključene sve varijable za koje postoji fizikalno utemeljena pretpostavka da mogu utjecati na spektralnu raspodjelu zračenja (geometrijske, atmosferske i meteorološke veličine). Na toj osnovi definiran je širi kandidatski skup ulaznih varijabli i njihovih funkcijskih kombinacija, iz kojeg je kasnije odabran uži skup koji ulazi u konačne analitičke jednadžbe.

4.3.1. Određivanje SF faktora

Spektralno ozračenje čini primarni ulaz za izračun faktora spektralne korekcije (*SF*), koji predstavlja ciljnu (izlaznu) varijablu razvijenog modela. *SF* se za pojedinu FN tehnologiju definira kao omjer struje kratkog spoja koju bi modul proizveo pod stvarnim spektrom i one pod referentnim spektrom AM 1.5, normaliziran za ukupno ozračenje (jednadžba 2.10). Stoga su visokokvalitetna mjerenja spektralnog ozračenja u širokom području valnih duljina ključna za dobivanje pouzdanih referentnih vrijednosti *SF*-a koje model nastoji aproksimirati.

U ovom radu jednadžba 2.10 numerički je primijenjena na svako vremensko mjerenje i svaku od devet FN tehnologija. Spektralni odzivi tehnologija određeni su laboratorijskim mjerenjima (opisano u trećem poglavlju) i prikazani na slici 3.2, dok se umjesto integrala mjerenog spektra koristi ukupno ozračenje izmjereno piranometrom, sukladno preporukama iz literature [31,46,53], čime se izraz 2.10 svodi na oblik:

$$SF = \frac{\int E(\lambda)SR(\lambda)d\lambda}{\int E^*(\lambda)SR(\lambda)d\lambda} \cdot \frac{G^*}{G} \quad (4.1)$$

4.3.2. Mjerenje spektralnog ozračenja

Na lokacijama Golden i Almeria spektralno ozračenje mjerilo se uparenim spektrometrima MS-711 i MS-712 (EKO WISER I) postavljenim na vodoravnu plohu, koji zajedno pokrivaju raspon od 290 do 1650 nm i pružaju mjerenja spektralnog ozračenja s vremenskom razlučivošću od jedne minute (mjerne postavke sa obje lokacije prikazane su na slici 4.5). U Lindenbergu je korišten Precision Spectroradiometer (PSR), koji mjeri spektar u rasponu 300-1050 nm s vremenskom razlučivošću od pet minuta. PSR koristi termički stabilizirani CCD detektor i integrirajuću sferu kao ulaznu optiku, čime se postiže visoka točnost u UV i vidljivom području [76]. Karakteristike oba mjerna uređaja prikazane su u tablici 4.2.



Slika 4.5 Mjerenje spektra WISER I sustavom na lokacijama Golden (lijevo) i Almeria (desno).

Tablica 4.2 Karakteristike korištenih spektrometara.

Uređaj	EKO WISER I (MS-711 + MS-712)	PMOD/WRC PSR
Vrsta mjerenja	Spektralno ozračenje	Spektralno ozračenje
Spektralni raspon (nm)	290-1650	300-1050
Spektralna rezolucija	<7 nm	1,5-5 nm
Detektor	Termički stabilizirani CCD	Termički stabilizirani CCD
Ulazna optika	Kosi kolektor / difrakcijska rešetka	Integrirajuća sfera
Vremenska razlučivost	1 min	1 min
Istraživački centar	NLR SRRL	PSA (CIEMAT/DLR)

4.3.3. Ekstrapolacija mjerenog spektralnog ozračenja

Budući da spektralni odzivi pojedinih FN tehnologija prelaze granice mjerenih spektralnih raspona (slika 3.2), bilo je neophodno rekonstruirati potpuni Sunčev spektar u rasponu 280-4000 nm. Rekonstruirani spektar u tom punom rasponu također omogućuje i precizan izračun ukupnog integriranog ozračenja iz spektralnih mjerenja, koje je potom korišteno za provjeru kvalitete podataka usporedbom s mjerenjem piranometra. Za lokaciju Almeria ekstrapolaciju je

izvršio istraživački tim CIEMAT/DLR i podaci su isporučeni u gotovom obliku, dok je za lokacije Golden i Lindenberg ekstrapolacija provedena u okviru ovog istraživanja.

Primijenjena metodologija temelji se na skaliranju referentnog AM 1,5 spektra u nemjerenim spektralnim područjima i opisana je u radu [160], a potvrđena je primjenom u nizu kasnijih istraživanja [31,60,161,162]. Osnovna pretpostavka metode je da omjer između mjerenog i referentnog spektra u valnom pojasu neposredno susjednom nemjerenom području vjerno opisuje atmosferske uvjete i u tom nemjerenom području. Ekstrapolacija je provedena zasebno za dva spektralna područja:

1. Ekstrapolacija u NIR i SWIR području: Za svaki mjereni spektar izračunava se faktor skaliranja R_{NIR} kao omjer integriranog mjerenog i integriranog referentnog AM 1,5G spektra u reprezentativnom pojasu 700-1100 nm, u kojemu dominiraju apsorpcija vodene pare i uniformno pomiješanih plinova:

$$R_{NIR} = \frac{\int_{700}^{1100} E_{meas}(\lambda) d\lambda}{\int_{700}^{1100} E_{ref}(\lambda) d\lambda} \quad (4.2)$$

Ekstrapolirani spektar u nemjerenom NIR/SWIR dijelu (1050-4000 nm za Lindenberg; 1650-4000 nm za Golden) dobiva se skaliranjem referentnog spektra tim faktorom:

$$E_{extrap,NIR}(\lambda) = R_{NIR} \cdot E_{ref}(\lambda). \quad (4.3)$$

2. Ekstrapolacija u UV području: Analogno je primijenjena metoda omjera za UV ekstrapolaciju, pri čemu je kao reprezentativno područje za skaliranje korišten pojas 303-340 nm (Lindenberg) odnosno 290-340 nm (Golden). Taj je pojas odabran jer se neposredno naslanja na nemjereno UV područje i podliježe istim atmosferskim procesima - Rayleighovom raspršenju te apsorpciji ozona (O_3) i molekularnog kisika (O_2).

Konačni, potpuni spektar od 280 do 4000 nm konstruiran je kombinacijom triju segmenata:

1. ekstrapolirani UV segment (280 do 290/300 nm)
2. izravno mjereni segment (290/300 do 1650/1050 nm)
3. ekstrapolirani NIR-SWIR segment (1650/1050 do 4000 nm).

Granice segmenata razlikuju se između lokacija sukladno spektralnom rasponu pojedinih instrumenata. Opisani pristup osigurava fizikalno konzistentnu rekonstrukciju spektra Sunčeva zračenja koja je neophodna za precizan proračun $SF-a$ za svaku od razmatranih FN tehnologija.

4.3.4. Mjerenje ozračenja

Za mjerenje ukupnog vodoravnog, izravnog normalnog i raspršenog vodoravnog ozračenja (G , D , B_n) korišteni su vrhunski instrumenti prema ISO 9060:2018 i WMO standardima: Kipp & Zonen CMP22 piranometar za G/D , kombinacija CMP22 i CM121 Shadow Ring za D , te Kipp & Zonen CHP1 pirheliometar za B_n . CMP22 je spektralno ravni piranometar klase A sa širokim rasponom 200-3600 nm, dok CHP1 pokriva približno 200-4000 nm i mjeri samo izravno zračenje u uskom vidnom polju. Mjerni instrumenti sa lokacija prikazani su na slikama 4.6-4.8.

Sva mjerenja G , D i B_n provođena su s vremenskom razlučivošću od 1 minute, što je omogućilo primjenu detaljnih procedura kontrole kvalitete spektralnih mjerenja i provjere konzistentnosti između komponenata ozračenja.



Slika 4.6 Mjerenje G u Almeriji.



Slika 4.7 Mjerenje G (lijevo) te D i B_n (desno) u Lindenbergu.



Slika 4.8 Mjerenje G (lijevo) te D i B_n (desno) u Goldenu.

4.3.5. Specijalizirana mjerenja iz AERONET mreže

Za opis atmosferskih uvjeta korišteni su podaci iz AERONET (engl. *Aerosol Robotic Network*), globalne mreže standardiziranih filtarskih radiometara koju koordiniraju NASA i međunarodni partneri. Mreža osigurava dugoročnu, kontinuiranu i javno dostupnu bazu podataka o optičkim svojstvima aerosola te taložnoj vodnoj pari, uz jedinstvene protokole kalibracije, obrade i distribucije [163].

Sve AERONET postaje koriste automatizirani fotometar Cimel CE-318, koji mjeri izravno spektralno ozračenje na devet tipičnih spektralnih kanala u rasponu približno 340-1640 nm, s vidnim poljem oko $1,2^\circ$ (detalji prikazani u Tablici 4.3). Standardizacija instrumenta i postupaka čini CE-318 referentnim uređajem za određivanje optičke dubine aerosola, Ångströmovog eksponenta i taložne vodene pare na globalnoj razini [164].

Sve tri lokacije korištene u ovoj disertaciji (Golden, Almeria i Lindenberg) dio su AERONET mreže. Korišteni su podaci najviše razine kvalitete (Level 2.0), tj. kvalitativno osiguranih zapisa koji prolaze kroz automatizirano filtriranje mjerenja zamućenih oblacima, provjeru kalibracije i uklanjanje odstupajućih vrijednosti, čime se postiže visoka pouzdanost.

Za potrebe istraživanja preuzete su AOD vrijednosti na više valnih duljina u vidljivom području, pripadni Ångströmovi eksponenti definirani za različite parove valnih duljina te taložna vodena para, izražena u centimetrima. Navedene veličine kombinirane su u nekoliko alternativa za opis optičkih svojstava aerosola i taložne vodene pare koje su testirane kao kandidatske ulazne varijable isključivo za modele vedrog neba, zbog zahtjeva AERONET mjerenja za stabilnim izravnim Sunčevim snopom i odsutnošću oblaka.

Tablica 4.3 Karakteristike CIMEL CE-318 mjernog uređaja.

Tip instrumenta	Automatski spektralni filtarski radiometar
Vidno polje	1,2° (puni kut)
Spektralni kanali (nm)	340, 380, 440, 500, 675, 870, 940, 1020
Širina pojasa filtra (FWHM)	2 - 10 nm (ovisno o kanalu)
Korištena vrsta podataka	Level 2.0 (cloud-screening, kalibrirano)
Točnost praćenja Sunca	±0,05°
Napajanje	FN modul (autonoman rad)
Prijenos podataka	Satelitski (GOES, METEOSAT) u gotovo stvarnom vremenu

4.3.6. Ostala mjerenja

Na lokaciji Golden, temperatura zraka i relativna vlažnost mjereni su HMP-45C senzorom, a atmosferski tlak PTB101B barometrom; svi podaci korišteni su kao jednominutne srednje vrijednosti temeljene na uzorkovanju od jedne sekunde. Na lokaciji Almeria, temperatura i relativna vlažnost mjereni su CS215 senzorom, a atmosferski tlak Setra 278 senzorom, pri čemu su jednominutne srednje vrijednosti temeljene na uzorkovanju od jedne sekunde. Na lokaciji Lindenberg, temperatura zraka, relativna vlažnost i atmosferski tlak mjerili su se standardiziranom meteorološkom opremom njemačke meteorološke službe (DWD), uz rutinsku kontrolu kvalitete i sljedivost prema WMO/ISO standardima. U analizi su također korištene usklađene jednominutne srednje vrijednosti ovih mjerenja. Popis svih korištenih varijabli dat je u tablici 4.4.

4.4. Metodologija razvoja modela

4.4.1. Kriteriji kontrole kvalitete mjerenog spektra i ozračenja

Nakon ekstrapolacije spektra na raspon 280-4000 nm primijenjen je jedinstven skup kriterija za odabir mjerenja koja ulaze u daljnju analizu i modeliranje:

1. Ograničenje zenitnog kuta Sunca: isključena su sva mjerenja sa zenitnim kutom $\theta_z > 60^\circ$, sukladno preporukama iz literature [24] i izravnoj komunikaciji s dr. Christianom

Gueymardom (osobna komunikacija, prosinac 2025.), kako bi se minimizirao utjecaj gubitaka zbog upadnog kuta (AOI gubici).

2. Stabilnost indeksa vedrine neba: uveden je kriterij stabilnosti ozračenja pri kojem se promatra promjena indeksa vedrine između dvaju uzastopnih mjerenja i standardnoj devijaciji 15 uzastopnih mjerenja; to je napravljeno s ciljem izbjegavanja razdoblja s brzom promjenom oblačnosti, u kojima piranometar i spektrometar, zbog vremenske interpolacije, mogu „vidjeti“ različite atmosferske uvjete. Zadržana su samo

Tablica 4.4 Popis svih korištenih varijabli.

Kategorija	Varijabla	Mjerna jedinica	Izvor podataka	Mjereni instrument / Metoda
Osnovna mjerenja	Spektralno ozračenje	W/m ² /nm	Izravno mjerenje	Spektrometar
	Spektralni odziv FN tehnologija	A/W	Izravno mjerenje	Laboratorijsko mjerenje spektralnog odziva
Standardne meteorološke varijable	G	W/m ²	Izravno mjerenje	Piranometar
	D	W/m ²	Izravno mjerenje	Piranometar sa zasjenom (difuzometar)
	B_n	W/m ²	Izravno mjerenje	Pirheliometar
	Temperatura zraka	K	Izravno mjerenje	Termometar (HMP-45C / CS215)
	Relativna vlažnost zraka	%	Izravno mjerenje	Higrometar (HMP-45C / CS215)
	Atmosferski tlak	hPa	Izravno mjerenje	Barometar (PTB101B / Setra 278)
Specijalizirane varijable	Taložna vodena para (W)	cm	AERONET	Filtarski radiometar CIMEL CE-318
	Optička dubina aerosola (AOD)	-	AERONET	
	Ångströmov eksponent (AE)	-	AERONET	
Izračunate varijable	Masa zraka (AM)	-	Solarna geometrija	Kasten-Young formula
	Tlačno korigirani AM (AM_a)	-	$AM + P$	Korekcija AM na stvarni tlak
	Indeks vedrine neba (K_t)	-	$G + \text{Bird model}$	Omjer G i G_{es} za vedro nebo (Birdov model)
	Udio raspršenog ozračenja (R_d)	-	$D + G$	Omjer D/G
Ciljna varijabla	Faktor spektralne korekcije SF	-	Izračun	Integracija spektralnog ozračenja i spektralnog odziva FN tehnologije

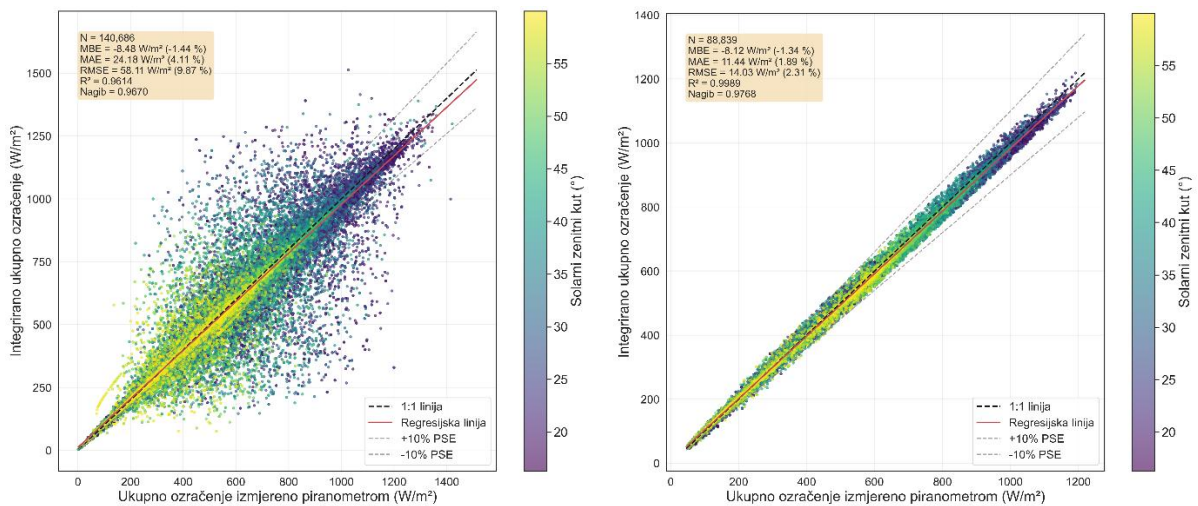
ona mjerenja za koja je apsolutna promjena indeksa vedrine između dvaju uzastopnih uzoraka manja ili jednaka 0,1 te je standardna devijacija 15 uzastopnih vrijednosti indeksa vedrine manja ili jednaka 0,1 (sukladno preporuci iz literature [53] i izravnoj komunikaciji s dr. Christianom Gueymardom (osobna komunikacija, prosinac 2025.):

$$|K_t(i) - K_t(i - 1)| \leq 0,1 \quad (4.4)$$

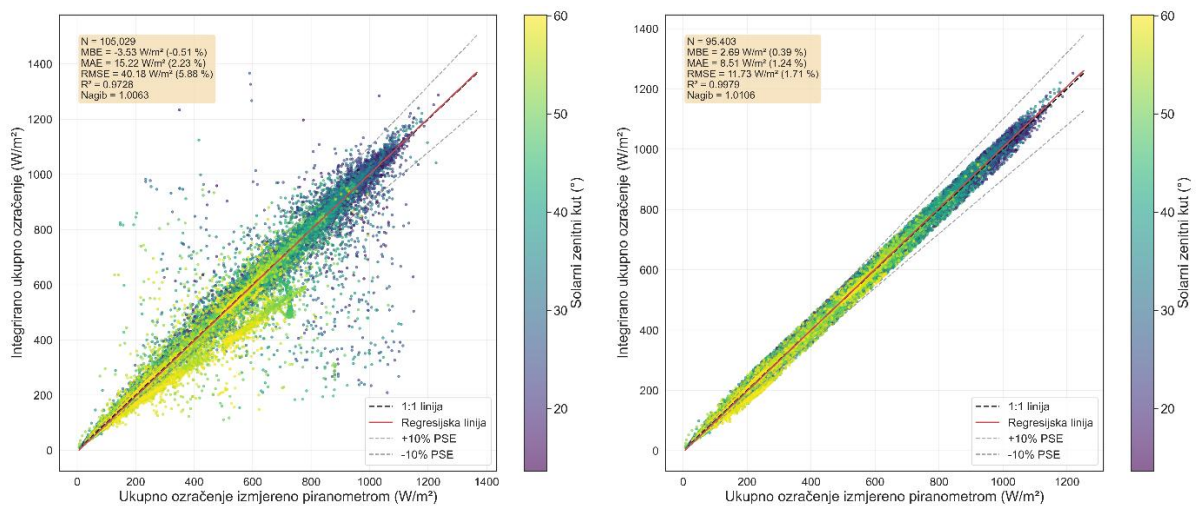
$$\sigma_{15}(i) = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{j=i-7}^{i+7} (K_t(j) - \overline{K_t})^2} \leq 0,1 \quad (4.5)$$

3. Ograničenje niske razine ozračenja: uklonjena su sva mjerenja za koje je ukupno ozračenje manje od 50 W/m².
4. Instrumentalne pogreške: uklonjena su mjerenja s negativnim vrijednostima spektralnog ozračenja, nulama ili drugim očitim nefizikalnim ekstremima koji ukazuju na pogrešno očitavanje mjernog instrumenta.
5. Dnevnici mjerenja i prethodna kontrola kvalitete: Za Almeriu i Lindenberg korišteni su dnevnici mjerenja s bilješkama o prekidima mjerenja, zaprljanju optike, pojavi rose, intervencijama na instrumentima i sl. te su sva takva razdoblja sustavno isključena. Za Golden je osnovnu kontrolu kvalitete nad spektralnim podacima proveo NLR prije distribucije podataka, te su u ovom radu korišteni već filtrirani podaci.
6. Dodatna kontrola kvalitete na podacima iz Almerie: DLR je proveo usporedbu mjerenog spektra sa sintetiziranim spektrom (SMARTS2, SEDES2), pri čemu je u ovom radu korišten već validiran skup podataka.
7. Validacija integriranim ozračenjem (G_{spec}): Integrirano spektralno ozračenje (G_{spec}), dobiveno integracijom rekonstruiranog spektra 280-4000 nm, uspoređeno je s G mjerenim piranometrom; mjerenja s odstupanjima većim od 50 W/m² označena su kao sumnjiva i uklonjena.
8. Provjera konzistentnosti mjerenja G : Provedena je provjera konzistentnosti mjerenja G s izračunatom vrijednošću dobivenom kao zbroj izravnog zračenja projiciranog na vodoravnu plohu ($B_n \cdot \cos(\theta_z)$) i raspršenog ozračenja na vodoravnu plohu (D). Kao kriterij kvalitete zadržana su samo ona mjerenja za koja relativno odstupanje između izmjerenog G i izračunate vrijednosti ne prelazi 5% [165].

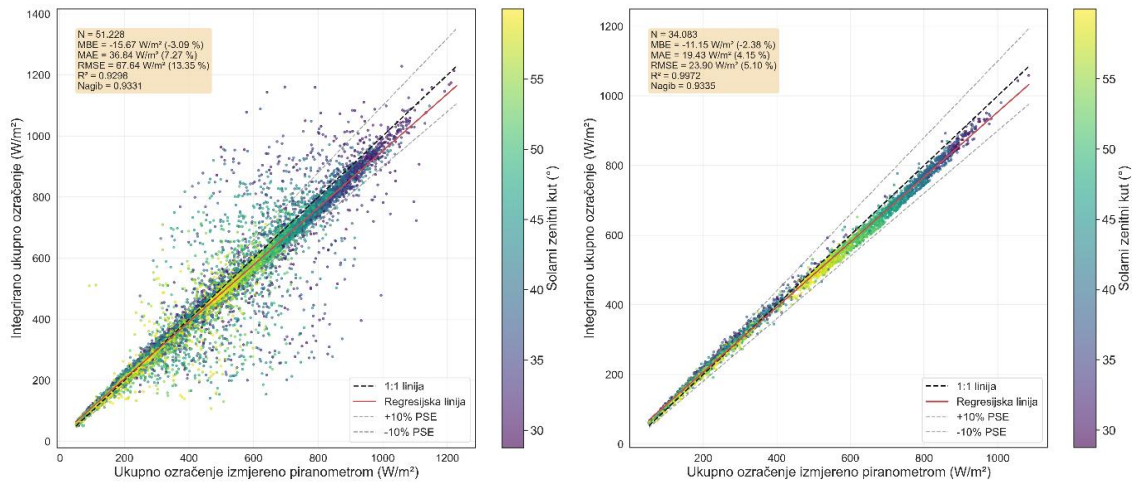
Prednost ovako provedene kontrole kvalitete spektralnih podataka najbolje se vidi kroz usporedbu ukupnog ozračenja dobivenog integracijom ekstrapoliranog spektra (G_{spec}) i mjerenja piranometrom (G). Kao što pokazuju slike 4.9-4.11 i metrike (definirane u poglavlju 4.4.3) u tablici 4.5, primjena opisanih filtara značajno poboljšava slaganje G_{spec} i G , čime se osigurava kvalitetan i za daljnju analizu pouzdan skup ulaznih spektralnih podataka. Za lokaciju Golden nakon filtriranja ostalo je 63% od ukupnog skupa podataka, za Almeriu 90% i za Lindenberg 67%.



Slika 4.9 Usporedba G s piranometra i ukupnog integriranog ozračenja dobivenog iz spektra Sunčeva zračenja za Golden za nefiltrirane (lijevo) i filtrirane (desno) podatke.



Slika 4.10 Usporedba G s piranometra i ukupnog integriranog ozračenja dobivenog iz spektra Sunčeva zračenja za Almeriju za nefiltrirane (lijevo) i filtrirane (desno) podatke.



Slika 4.11 Usporedba G s piranometra i ukupnog integriranog ozračenja dobivenog iz spektra Sunčeva zračenja za Lindenberg za nefiltrirane (lijevo) i filtrirane (desno) podatke.

Tablica 4.5 Evaluacijske metrike za sve tri lokacije prije i nakon primijenjene kontrole kvalitete podataka.

Lokacija	Stanje	MBE [W/m^2]	MAE [W/m^2]	RMSE [W/m^2]	R^2
Golden	Prije	-8,48 (-1,44%)	24,18 (4,11%)	58,11 (9,87%)	0,961
	Nakon	-8,12 (-1,34%)	11,44 (1,89%)	14,03 (2,31%)	0,999
Almeria	Prije	-3,53 (-0,51)	15,22 (2,23%)	40,18 (5,88%)	0,972
	Nakon	2,69 (0,39%)	8,51 (1,24%)	11,73 (1,71%)	0,998
Lindenberg	Prije	-15,67 (-3,09%)	38,84 (7,27%)	67,64 (13,35%)	0,930
	Nakon	-11,15 (-2,38%)	19,43 (4,15%)	23,90 (5,10%)	0,997

4.4.2. Referentni modeli iz literature

Kako bi se kvantitativno ocijenila dodana vrijednost predloženih modela, prvo je potrebno definirati skup referentnih modela iz literature koji će služiti kao izravna usporedna osnova. Odabrano je ukupno pet modela za usporedbu, i to dva modela za sve uvjete neba i tri modela za vedro nebo, koji su detaljno opisani u drugom poglavlju te se ovdje neće dodatno analizirati. Modeli za sve uvjete neba uključuju Sandia AM (SAPM), jednoparametarski model koji opisuje

SF kao polinom četvrtog reda u apsolutnoj masi zraka i kalibriran je za više FN tehnologija te PVSPEC AM- K_t , potencijski model koji izravno parametizira SF u funkciji AM i K_t , s koeficijentima specifičnim za pojedinu tehnologiju. Skup modela za uvjete vedrog neba čine First Solar Spectral 2.0, dvoparametarski AM-W polinom koji kombinira apsolutnu masu zraka i taložnu vodenu paru, Spectral 3.0 AM-W-CSI, troparametarski model koji dodatno uvodi indeks vedrog neba CSI za opis spektralnih promjena pod oblacima, te Caballero AM-W-AOD model, troparametarski pristup s tehnološki specifičnim analitičkim izrazima za pojedine FN tehnologije. Analitičke jednadžbe svih navedenih modela sažete su u tablici 4.6 (za AM-W-AOD model detaljne jednadžbe su navedene u tablici 2.7).

Tablica 4.6 Pregled modela spektralne korekcije.

Naziv	Jednadžba modela
AM (Sandia SAPM) [43]	$SF = \beta_0 + \beta_1 \cdot AM_a + \beta_2 \cdot (AM_a)^2 + \beta_3 \cdot (AM_a)^3 + \beta_4 \cdot (AM_a)^4$
PVSPEC [53]	$SF = \beta_0 k_t^{\beta_1} AM_a^{\beta_2}$
First Solar (Spectral 2.0) [47]	$SF = \beta_0 + \beta_1 \cdot AM_a + \beta_2 \cdot W + \beta_3 \cdot \sqrt{AM_a} + \beta_4 \cdot \sqrt{W} + \beta_5 \cdot \frac{AM_a}{\sqrt{W}}$
First Solar (Spectral 3.0) [48]	$SF = \beta_0 + \beta_1 CSI + \beta_2 W + \beta_3 AM_a$
Caballero AM-W-AOD [60]	$SF = f_{SAPM} + f_{AOD} + f_W$

4.4.3. Evaluacijske metrike

Za vrednovanje točnosti razvijenih modela korištene su tri razine metrika koje zajedno obuhvaćaju trenutačnu preciznost i dugoročnu energetska točnost.

Standardne metrike koje su korištene su srednja apsolutna pogreška (engl. *mean absolute error* - MAE), korijen srednje kvadratne pogreške (engl. *root mean square error* - RMSE) i srednja sustavna pogreška (engl. *mean bias error* - MBE),, koje se koriste za kvantifikaciju statističke kvalitete predikcije SF-a u pojedinačnim vremenskim koracima:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |SF_{mod,i} - SF_i| \quad (4.6)$$

$$RMSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{(SF_{mod,i} - SF_i)^2} \quad (4.7)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SF_{mod,i} - SF_i) \quad (4.8)$$

gdje je $SF_{mod,i}$ izračunata vrijednost $SF-a$ korištenjem predloženog modela za i -to mjerenje, a SF_i stvarna vrijednost $SF-a$ za i -to mjerenje. Premda su MAE, RMSE i MBE standardno korišteni pokazatelji u statističkom modeliranju, u ovom istraživanju su uključeni prvenstveno kako bi se jasno pokazala razlika u odnosu na energetski relevantnije, ozračanjem ponderirane metrike. Naime, za primjene u FN sustavima oni su sami po sebi nedostatni i potencijalno obmanjujući, jer implicitno pretpostavljaju da svaka vrijednost faktora spektralne korekcije doprinosi jednako ukupnoj pogrešci, neovisno o razini ozračenja. U stvarnosti, pogreška modela u periodima kada je ozračenje minimalno ima gotovo zanemariv utjecaj na godišnji energetski prinos. Nasuprot tome, pogreška u vedrim periodima oko solarnog podneva, kada ozračenje dostiže vrhunac i kada FN sustav generira najveći udio svoje godišnje električne energije, nosi neusporedivo veće posljedice za točnost procjene energetskog prinosa. Model koji pokazuje niski MAE, ali sustavno griješi upravo u tim energetski kritičnim trenucima bio bi u praksi neupotrebljiv. Iz tog razloga uvode se ozračanjem ponderirane metrike wMAE, wRMSE i wMBE, koje svaki doprinos skaliraju proporcionalnom energetskom težinom trenutka mjerenja, čime se strože penaliziraju pogreške u periodima visoke proizvodnje:

$$wMAE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |SF_{mod,i} - SF_i| \cdot GHI_i}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n GHI_i} \quad (4.9)$$

$$wRMSE = \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SF_{mod,i} - SF_i)^2 \cdot GHI_i}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n GHI_i}} \quad (4.10)$$

$$wMBE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SF_{mod,i} - SF_i) \cdot GHI_i}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n GHI_i} \quad (4.11)$$

Iako metrike ponderirane na ovaj način ispravno odražavaju energetsku važnost pojedinih trenutaka, još uvijek mjere trenutačnu pogrešku - tj. koliko svaki modelirani SF odstupa od vrijednosti koja je proračunata iz izmjenjenog spektra. Međutim, najvažniji cilj razvijenog modela nije precizna procjena trenutačnog $SF-a$, nego točna procjena kumulativnog godišnjeg spektralnog učinka na energetski prinos FN sustava.

Stoga, apsolutna pogreška dugoročnog spektralnog učinka predstavlja ključni kriterij kvalitete modela jer izravno odražava pogrešku u procjeni kumulativnog spektralnog doprinosa godišnjem energetske prinosu FN sustava. Definirana je izrazom:

$$AE = \left| \frac{\sum_{i=1}^n SF_{mod,i} \cdot GHI_i}{\sum_{i=1}^n GHI_i} - \frac{\sum_{i=1}^n SF_i \cdot GHI_i}{\sum_{i=1}^n GHI_i} \right| \quad (4.12)$$

Ova metrika ima neposredno praktično značenje: pri projektiranju novih FN elektrana ili procjeni rada postojećih, sve energetske simulacije provode se na godišnjoj razini, a ključno pitanje je koliko godišnja proizvodnja raste ili pada zbog spektralnih varijacija. Model koji ispravno reproducira taj godišnji integralni učinak pouzdan je alat za energetske planiranje, dok model koji taj godišnji iznos sustavno precjenjuje ili podcjenjuje dovodi do pogrešnih financijskih i tehničkih odluka.

Uz navedene metrike točnosti, korištene su i statističke mjere raspršenosti za procjenu stabilnosti i pouzdanosti dobivenih rezultata. Standardna devijacija (SD) definirana je kao:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2} \quad (4.13)$$

gdje je n broj (npr. $n=5$ tj. broj dijelova u peterostruko unakrsnoj validaciji ili $n=3$ broj lokacija kod validacije modela na tri pojedinačne lokacije), x_j j -ta vrijednost, a \bar{x} aritmetička sredina. Relativna standardna devijacija (RSD) izražava SD kao postotak srednje vrijednosti:

$$RSD = \frac{\sigma}{|\bar{x}|} \cdot 100\% \quad (4.14)$$

čime se omogućuje usporedba varijabilnosti između veličina različitih apsolutnih iznosa. Standardna pogreška srednje vrijednosti (SP) mjeri nesigurnost procjene srednje vrijednosti i definirana je kao:

$$SE = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \cdot 100\% \quad (4.15)$$

a odgovarajuća relativna standardna pogreška (RSE):

$$RSE = \frac{SE}{|\bar{x}|} \cdot 100\% \quad (4.16)$$

Niska vrijednost standardne devijacije ukazuje na malu raspršenost rezultata oko srednje vrijednosti, dok niska standardna pogreška potvrđuje da je procjena same srednje vrijednosti pouzdana i stabilna.

4.4.4. Neuravnoteženost skupova podataka i inverzno frekvencijsko uzorkovanje

Sljedeći je korak razmotriti strukturu samog skupa podataka, jer način na koji su uzorci raspoređeni po lokacijama izravno utječe na sve te metrike i na konačne koeficijente modela. Prostorna neuravnoteženost spojenog skupa podataka vrlo je jasno vidljiva na slici 4.12, koja prikazuje raspodjelu mjerenja za sve tri lokacije za sve uvjete neba i samo za vedro nebo. Skup podataka za uvjete vedrog neba odabran je prema kriteriju dostupnosti podataka iz AERONET baze (mjerenja su moguća samo kada nema utjecaja oblaka) i uvjeta za vedro nebo iz tablice 2.5 po kojemu K_t mora biti veći od 0,85. Almeria i Golden osjetno nadmašuju Lindenberg po broju dostupnih uzoraka za sve uvjete neba, dok je neravnomjernost za vedro nebo još izraženija: Almeria ima višestruko više uzoraka od preostale dvije lokacije. Za sve uvjete neba neba razlog je u učestalosti mjerenja: u Goldenu i Almeriji mjerenja spektrometra su prikupljana svake minute, a u Lindenbergu svakih pet minuta. Dodatno, za uvjete vedrog neba potrebno je upariti mjerenja sa spektrometra sa mjerenjem filtarskog radiometra. Kao što je rečeno u poglavlju 4.3.5, iz AERONET baze su korištena isključivo mjerenja najviše razine obrade (Level 2.0) kojih je u Goldenu i Lindenbergu znatno manje nego u Almeriji. Ta činjenica u kombinaciji s podatkom da AERONET mjerenja nisu moguća za oblačnog vremena uzrokovao je takvu raspodjelu podatkovnog skupa za vedro nebo. Podešavanje parametara na takvom neuravnoteženom skupu rezultiralo bi modelom koji implicitno optimizira za mediteransku suhu i planinsku polusušnu klimu nauštrb umjerene; njegova sposobnost pouzdanog predviđanja za umjerenu klimu karakterističnu za Lindenberg bila bi sustavno narušena. Kako bi se osiguralo da svaka od tri klimatske zone jednako utječe na podešavanje parametara, primijenjen je postupak inverznog frekvencijskog uzorkovanja (engl. *inverse frequency sampling*). Neka je S skup svih lokacija, $S = \{\text{Lindenberg, Almeria, Golden}\}$, a $|S|=3$ ukupan broj elemenata skupa, tj. lokacija. Ako N_s označava ukupan broj dostupnih uzoraka za lokaciju s , tada je ukupan broj uzoraka u globalnom skupu podataka:

$$N_{ukupno} = \sum_{s \in S} N_s \quad (4.17)$$

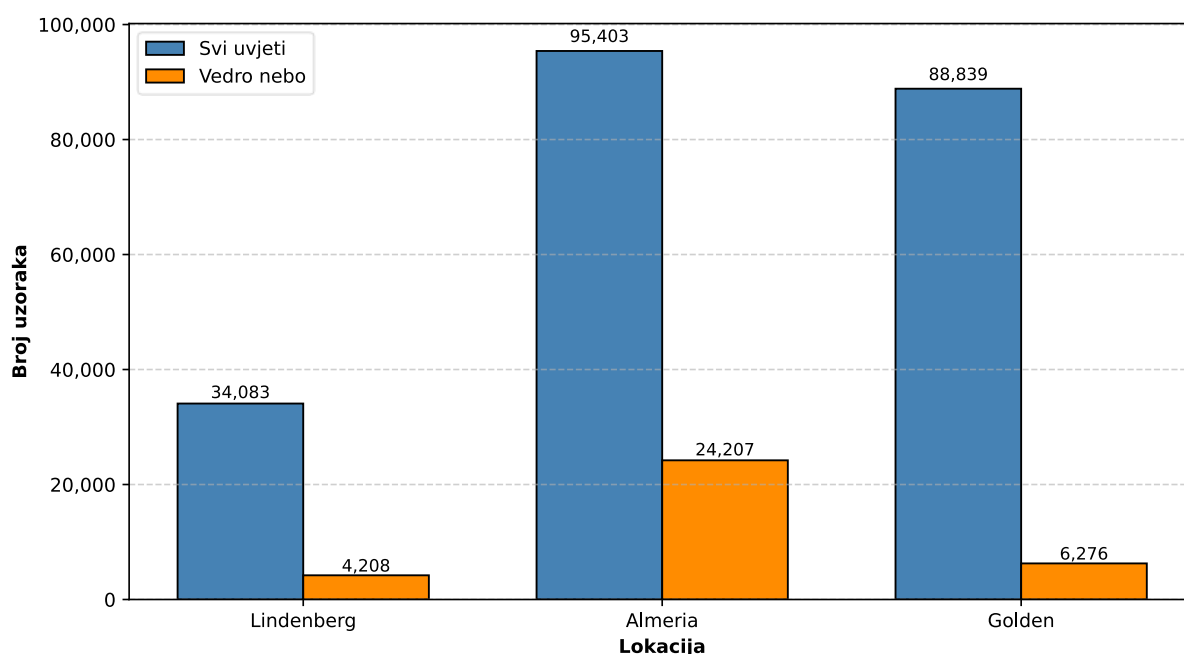
Svakom mjerenju koje pripada lokaciji s dodijeljena je težina w_s obrnuto proporcionalna zastupljenosti te lokacije u ukupnom skupu podataka:

$$w_s = \frac{N_{ukupno}}{|S| \cdot N_s} \quad (4.18)$$

Efektivni ponderirani doprinos svake lokacije tada iznosi:

$$W_s = N_s \cdot w_s = N_s \cdot \frac{N_{ukupno}}{|S| \cdot N_s} = \frac{N_{ukupno}}{|S|} \quad (4.19)$$

što znači da je efektivni utjecaj svake lokacije na proces podešavanja parametara matematički izjednačen na točno jednu trećinu ukupne težine, neovisno o stvarnom broju uzoraka. Na taj način algoritam uči opće fizikalne odnose između atmosferskih varijabli i faktora spektralne korekcije umjesto da memorira klimatski specifične obrasce dominantnih lokacija. Iste inverzne frekvencijske težine dosljedno su primijenjene u svim fazama razvoja modela: kao težine uzoraka pri postupku regresije za selekciju značajki te pri kasnijoj prilagodbi koeficijenata parametarskih modela (detaljno opisano u poglavljima 4.4.3 i 4.4.4), čime je osigurana metodološka konzistencija kroz sve faze razvoja modela.



Slika 4.12 Skup podataka za modeliranje po lokacijama.

4.4.5. Selekcija značajki

Ključni metodološki izazov pri razvoju parametarskih modela spektralne korekcije leži u odabiru optimalnog skupa značajki iz velikog prostora potencijalnih atmosferskih varijabli i njihovih matematičkih transformacija. Ručni odabir značajki, osim što je vremenski zahtjevan i podložan subjektivnosti, teško može obuhvatiti nelinearne interakcije između varijabli i njihovu promjenjivu važnost u različitim klimatskim režimima. Kako bi se taj proces automatizirao i objektivizirao, primijenjen je regresijski algoritam slučajne šume (engl. *Random Forest Regression - RF*), koji se u novijoj literaturi uspješno koristi za predikciju

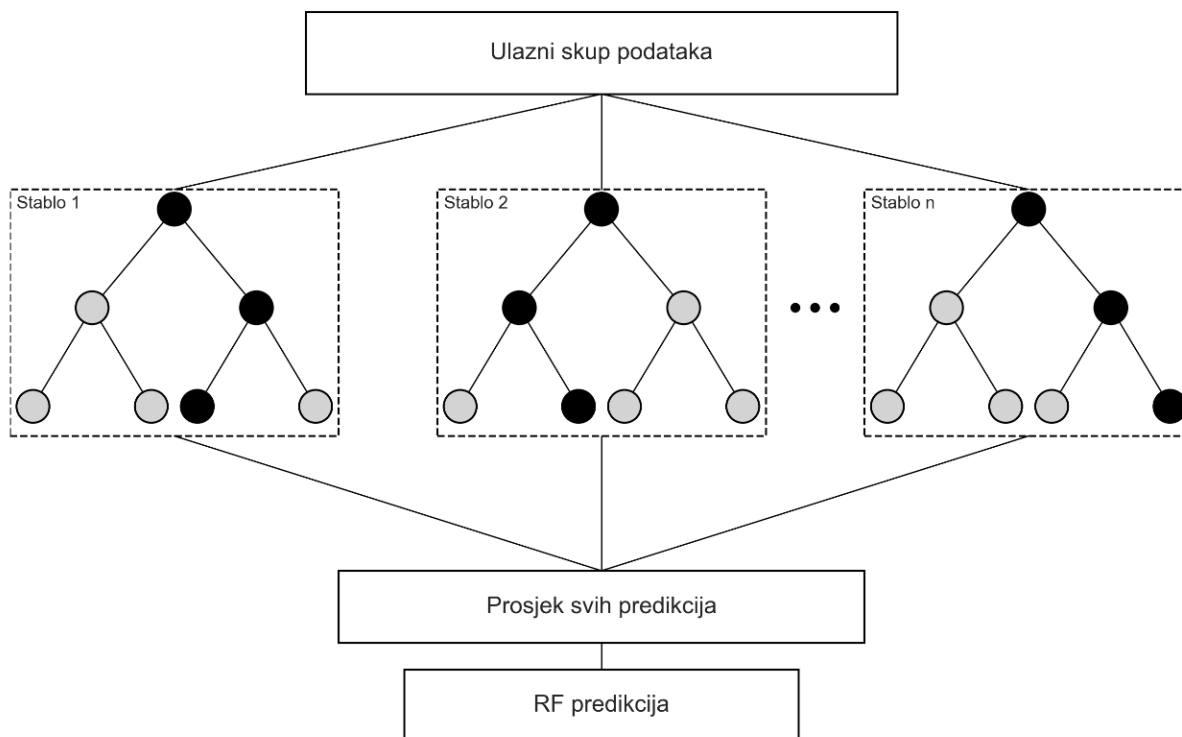
izlazne snage FN elektrana, detekciju degradacije i modeliranje odnosa između meteoroloških parametara i rada FN sustava [166–170].

Metoda slučajne šume je vrsta nadziranog strojnog učenja u kojoj se velik broj međusobno neovisnih stabala odlučivanja trenira na različitim podskupovima podataka, a njihove individualne predikcije kombiniraju u jedinstveni, robusniji izlaz, čime se istovremeno povećava točnost modela i smanjuje osjetljivost na pretreniranje. Algoritam se sastoji od sljedećih koraka ilustriranih na slici 4.13:

1. Za svako stablo se prvo nasumično generira novi nasumični podskup uzoraka tako da se uzorci biraju „s vraćanjem”, tj. isti uzorak može biti odabran više puta, dok neki zapisi uopće ne uđu u taj skup. Svako stablo u prosjeku trenira na oko 63% jedinstvenih uzoraka, dok približno 37% uzoraka ostaje izvan tog stabla. Svako stablo stoga uči na malo drugačijoj verziji skupa podataka, što povećava međusobnu raznolikost stabala i smanjuje sklonost modela pretreniranju na slučajne specifičnosti originalnog uzorka.
2. Na svakom čvoru stabla odabire se nasumični podskup od n značajki iz ukupnog skupa od m dostupnih značajki. Time se smanjuje korelacija između stabala i osigurava da nijedna dominantna varijabla ne određuje strukturu svih stabala.
3. Za svaki uzorak i odabrane značajke gradi se stablo odlučivanja korištenjem kriterija smanjenja varijance kao mjere kvalitete svakog razdvajanja. Proces raste dok se ne ispuni kriterij zaustavljanja (npr. maksimalna dubina stabla ili minimalan broj uzoraka po listu).
4. Agregacija predikcija - za zadani ulazni vektor x , svako stablo n daje vlastitu procjenu, a konačna regresijska predikcija dobiva se prosjekom svih N stabala:

$$\widehat{SF}_{RF} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \widehat{SF}^{(n)}(x) \quad (4.20)$$

To smanjuje varijancu pojedinačnih stabala čineći RF izrazito robusnim na šum i pri tome dobro opisujući nelinearne odnose među podacima. Treniranje RF-a provedeno je zasebno za svaku od devet FN tehnologija i za svaki od dva atmosferska režima. Kao što je rečeno, RF kao metoda ansambla gradi skup od N stabala odlučivanja, pri čemu svako stablo trenira na nasumičnom podskupu podataka i nasumičnom podskupu značajki. U ovom radu RF se ne koristi kao završni regresijski model, nego isključivo kao alat za procjenu važnosti značajki i generiranje rang-liste



Slika 4.13 Primjer regresije metodom slučajne šume.

značajki, dok se konačno modeliranje i validacija provode klasičnom linearnom regresijom (OLS) na odabranim podskupovima najvažnijih značajki. Odabrana konfiguracija od 500 stabala s maksimalnom dubinom 12 razina pokazala se dovoljnom da se stabilizira raspodjela važnosti značajki, pri čemu daljnje povećanje broja stabala nije mijenjalo poredak najvažnijih prediktora u statistički mjerljivoj mjeri, već je samo povećavalo računsko opterećenje. Odabir većeg broja relativno plitkih stabala u skladu je s preporukama iz literature, gdje se broj stabala najčešće uzima od nekoliko stotina naviše kako bi se stabilizirala procjena važnosti značajki i smanjila varijanca ansambla, dok se dubina ograničava kako bi se izbjeglo pretreniranje pojedinačnih stabala na šum u podacima, tj. da se model prilagodi slučajnim fluktuacijama umjesto stvarnim fizikalnim odnosima [171]. Primijenjen je mehanizam inverznog frekvencijskog uzorkovanja opisan u poglavlju 4.4.2, kojim je svaka od tri lokacije dobila jednaku težinu u procesu treniranja.

Za rangiranje značajki korištena je standardna RF metrika Gini importance [172,173]. Za svaku značajku ovaj pokazatelj mjeri kumulativno smanjenje varijance postignuto svim razdvajanjima u kojima se ta značajka pojavljuje, sumirano po svim čvorovima i prosječeno po svim stablima šume. Značajka koja se često pojavljuje u ranim, „jakim“ razdvajanjima i znatno smanjuje

varijancu predikcije dobiva veću važnost. Za svaku kombinaciju (tehnologija, atmosferski režim) izabrane su najvažnije značajke prema Gini rangiranju te su mapirane u standardni oblik linearne jednadžbe:

$$SF = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (4.21)$$

gdje X_1 - X_n predstavljaju od RF-a odabrane kombinacije atmosferskih varijabli, a β_1 - β_n koeficijente koji se naknadno određuju metodom OLS-a opisanom u poglavlju 4.4.4. Ispitane su razne verzije modela s dvije do šest značajki (sustavnim uklanjanjem odnosno dodavanjem značajki prema Gini rangiranju), no kombinacija četiri značajke konzistentno je davala najniže ponderirane pogreške i najmanju godišnju energetska pogrešku za model za sve uvjete neba, dok je za model vedrog neba za sve FN tehnologije to bio slučaj s kombinacijom od tri značajke.

4.4.6. Postupak prilagodbe koeficijenata i validacija

Kako bi se osigurala nepristrana usporedba razvijenih modela sa referentnim modelima iz literature, svi su modeli prilagođeni i vrednovani unutar jedinstvenog, strogo definiranog računalnog okvira. Ovaj okvir obuhvaća dvostupanjsku strategiju prilagodbe koeficijenata, u kojoj se koeficijenti najprije procjenjuju unutar peterostruke unakrsne validacije (engl. *5-fold cross-validation*) radi određivanja privremenih koeficijenata na temelju kojih se izračunavaju sve evaluacijske metrike, kako klasične tako i one ponderirane ukupnim ozračenjem. Dodatno, unutar istog postupka provjerava se i stabilnost evaluacijskih metrika i regresijskih koeficijenata kroz svih pet dijelova unakrsne validacije.

Da bi se izbjegla česta metodološka pogreška u literaturi gdje se modeli vrednuju na istom skupu podataka koji je korišten za određivanje koeficijenata, što dovodi do pretreniranja i precjenjivanja točnosti, u prvom koraku dvostupanjske strategije metrike se računaju isključivo na osnovu peterostruke unakrsne validacije. Skup podataka sa svake lokacije najprije je nasumično podijeljen na dva dijela: prvi sadrži 80% od ukupnih podataka, a drugi 20%. Nakon toga dijelovi sa po 80% podataka sa sve tri lokacije spajaju se u jedinstven skup podataka koji je korišten za peterostruku unakrsnu validaciju, a preostalih 20% se ostavlja za kasniju validaciju na pojedinačnim lokacijama. Zatim je napravljena peterostruka unakrsna validacija na tom jedinstvenom skupu podataka: u svakoj od pet iteracija model je prilagođen na četiri podskupa (80% podataka), a provjeren na petom, dotad neviđenom podskupu (20% podataka). Spajanjem svih procjena dobivenih na izdvojenim podskupovima formiran je potpuni skup procjena na temelju kojih su izračunate sve vrednovane metrike, pa tako dobivene procjene točnosti ostaju nepristrane. Najprije su prikazane prosječne vrijednosti metrika preko svih pet

dijelova peterostruke unakrsne validacije. Nakon toga su izračunate i prikazane standardne devijacije i standardne greške svih metrika i koeficijenata. Proračun standardne devijacije evaluacijskih metrika i koeficijenata je važan kako bi se dobile informacije o stabilnosti modela jer se na taj način pokazuje da model ne ovisi o specifičnom podskupu podataka korištenom za kalibraciju. Nakon peterosturke unakrsne validacije model se ponovno kalibrira na cjelokupnom skupu podataka kako bi se dobio konačni skup koeficijenata. Tako dobiven jedinstven skup koeficijenata namijenjen je praktičnoj primjeni, dok su privremeni koeficijenti dobiveni unutar pojedinih iteracija unakrsne validacije služili isključivo za procjenu točnosti modela. Dobiveni konačni skup koeficijenata u konačnici je korišten za validaciju modela na svakoj od tri pojedinačne lokacije (po 20% podataka koji su na samom početku ostavljeni u ovu svrhu). Osim toga, napravljena je i validacija na neovisnom skupu podataka.

Za određivanje koeficijenata referentnih modela iz literature koji su nelinearni (PVSPEC, First Solar FS2, Caballerov AM-W-AOD model) korišten je Levenberg-Marquardt (LM) algoritam nelinearne metode najmanjih kvadrata. Budući da navedeni modeli ovise nelinearno o parametrima (koeficijenti se pojavljuju u potencijama ili produktima), analitičko rješenje u obliku klasične linearne regresije ne postoji, pa je Levenberg-Marquardt primijenjen kao standardni algoritam za nelinearne probleme najmanjih kvadrata. Cilj algoritma je minimizirati ponderiranu sumu kvadrata reziduala:

$$\sum_{i=1}^{N_{ukupno}} \left(\frac{SF_i - f(x_i; \beta)}{\sigma_i} \right)^2 \quad (4.23)$$

gdje je SF_i izmjereni faktor spektralne korekcije, $f(x_i; \beta)$ vrijednost pripadnog modela iz literature, a σ_i efektivna standardna devijacija. Naime, inverzne frekvencijske težine za sve modele iz literature integrirane su izravno u funkciju cilja putem parametra standardne devijacije, što algoritam prisiljava da pogreške na manje zastupljenim uzorcima iz Lindenberga penalizira razmjerno jače. Za svaki uzorak i koji pripada lokaciji s definirana se:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{w_s}} \quad (4.24)$$

pri čemu je w_s težina lokacije s određena jednadžbom 4.14. Ovakvom definicijom σ_i se kvadratni rezidual svakog uzorka efektivno množi s pripadnom težinom w_s . Time se pogreške na podzastupljenoj lokaciji (Lindenberg) penaliziraju razmjerno jače, a na nadzastupljenim lokacijama (Almeria, Golden) slabije, što rezultira uravnoteženom, nepristranom globalnom prilagodbom modela.

Kod linearnih modela problem je moguće riješiti običnom metodom najmanjih kvadrata (OLS). Stoga je za određivanje koeficijenata predloženog modela i linearnih modela iz literature (SANDIA, First Solar FS3) korištena obična metoda najmanjih kvadrata. Kao i kod LM algoritma i OLS je proširena na ponderiranu varijantu s uključivanjem težina u funkciju cilja. Nakon što su odabrane značajke izračunate kao zasebne regresorske varijable, modeli postaju linearni u koeficijentima β . Koeficijenti se dobivaju minimizacijom ponderirane sume kvadrata reziduala:

$$\sum_{i=1}^{N_{ukupno}} w_i \left(SF_i - \left[\beta_0 + \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij} \right] \right)^2 \quad (4.25)$$

gdje w_i i predstavlja težinu opažanja i (inverzno proporcionalnu učestalosti lokacije), x_{ij} su unaprijed definirane značajke, a β_j su traženi koeficijenti.

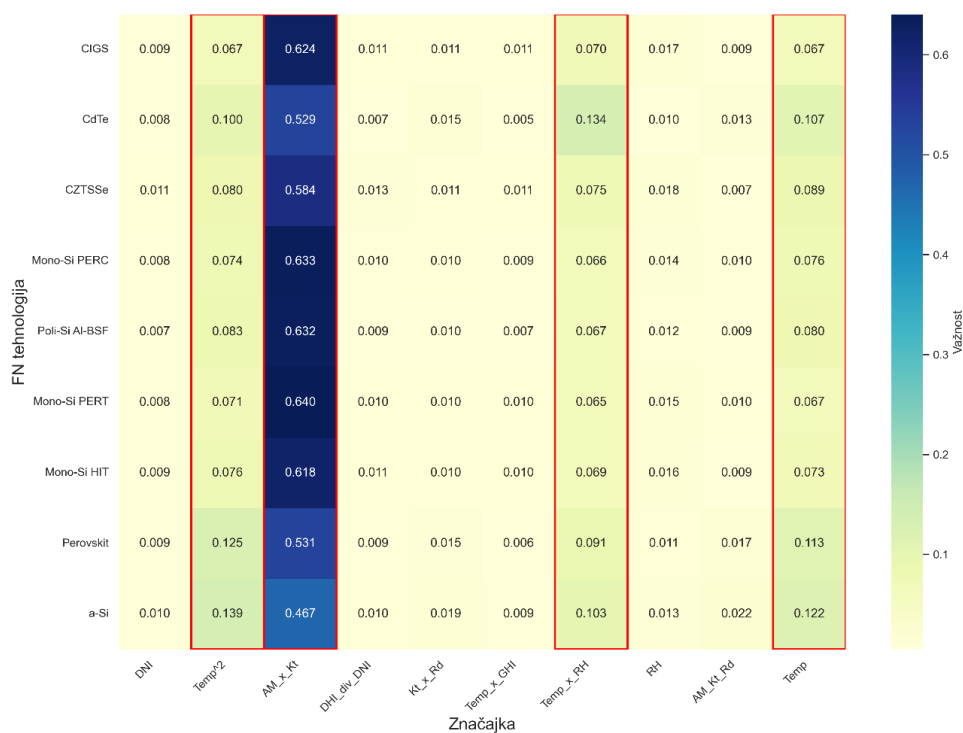
4.5. Rezultati peterostruke unakrsne validacije

4.5.1. Razvijeni model za sve uvjete neba

Kod skupa podataka koji uzima u obzir sve uvjete neba algoritam je konvergirao na vrlo konzistentan oblik za sve FN tehnologije. Relativne važnosti prvih 10 najviše rangiranih prediktora za sve tehnologije prikazane su toplinskom mapom na slici 4.14. Kao primarna značajka spektralnog učinka identificiran je kao umnožak apsolutne mase zraka i indeksa vedrine neba, koji fizikalno predstavlja oblačnošću modificiranu optičku putanju Sunčeva zračenja kroz atmosferu. Preostalu varijancu SF -a opisuje termalni profil atmosfere, modeliran kombinacijom kvadrata temperature T^2 , linearnog člana T i umnoška T i relativne vlažnosti zraka RH . Ta kombinacija fizikalno govoreći služi kao zamjena za sadržaj taložne vodene pare u atmosferi. Za sve uvjete neba dobiven je sljedeći kanonski oblik jednadžbe:

$$SF = \beta_0 + \beta_1(AM_a \cdot K_t) + \beta_2(T \cdot RH) + \beta_3 T^2 + \beta_4 T \quad (4.22)$$

Algoritamska konvergencija na identičnu strukturu značajki za sve FN tehnologije snažan je argument u prilog fizikalnoj utemeljenosti odabranih varijabli - RF nije odabrao specifičan skup varijabli za jednu tehnologiju, nego je za svaku neovisno prepoznao isti dominantni fizikalni mehanizam. U analizi je korišten prošireni skup ulaznih značajki koje su prikazane u tablici B.1 u Prilogu B. Toplinska mapa s prikazom relativne važnosti 10 najvažnijih značajki za sve tehnologije prikazana je na slici 4.14.



Slika 4.14 Toplinska mapa važnosti značajki za sve uvjete neba.

4.5.2. Peterostruka unakrsna validacija za model za sve uvjete neba

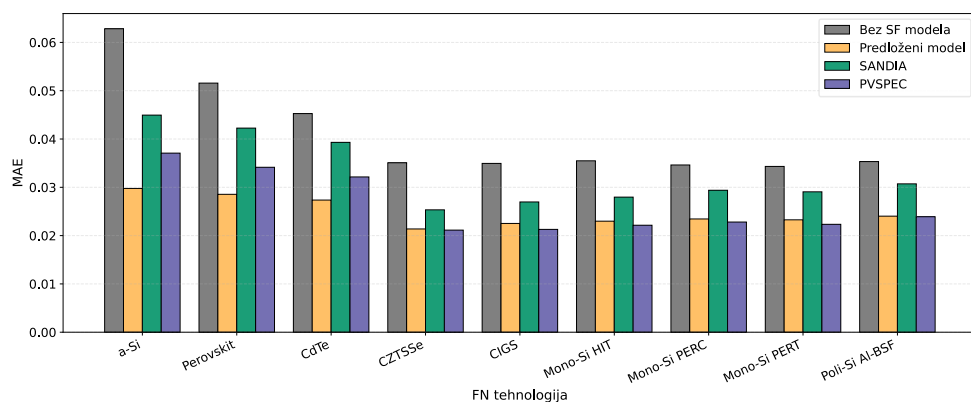
Konačni dobiveni skup koeficijenata za model za sve uvjete neba prikazan je tablici 4.8.

Tablica 4.7 Dobiveni koeficijenti za model za sve uvjete neba.

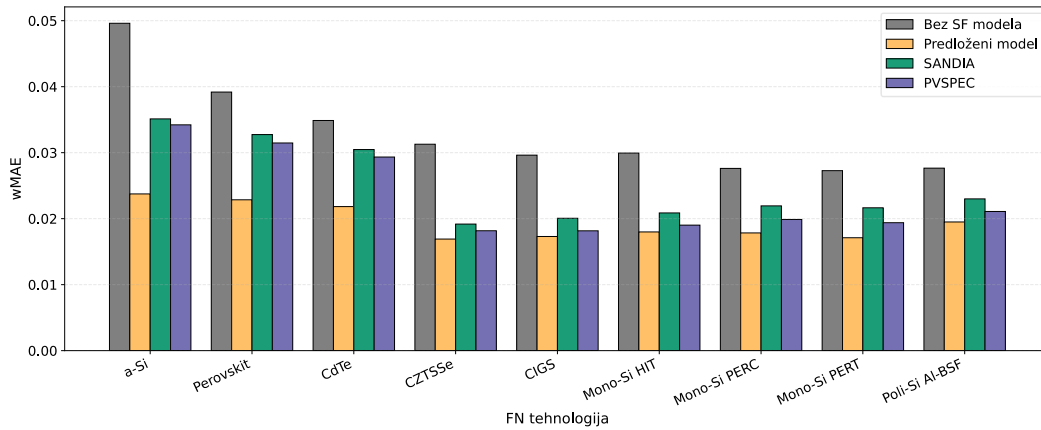
FN tehnologija	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4
a-Si	9,73246	$-7,52 \cdot 10^{-2}$	$3,88 \cdot 10^{-6}$	$1,10 \cdot 10^{-4}$	$-6,16 \cdot 10^{-2}$
Perovskit	8,39855	$-7,19 \cdot 10^{-2}$	$3,72 \cdot 10^{-6}$	$9,33 \cdot 10^{-5}$	$-5,23 \cdot 10^{-2}$
CdTe	7,48066	$-6,37 \cdot 10^{-2}$	$3,50 \cdot 10^{-6}$	$8,22 \cdot 10^{-5}$	$-4,61 \cdot 10^{-2}$
Mono-Si PERC	4,63326	$-5,83 \cdot 10^{-2}$	$1,95 \cdot 10^{-6}$	$4,56 \cdot 10^{-5}$	$-2,56 \cdot 10^{-2}$
Mono-Si PERT	4,44761	$-5,91 \cdot 10^{-2}$	$1,87 \cdot 10^{-6}$	$4,32 \cdot 10^{-5}$	$-2,43 \cdot 10^{-2}$
Mono-Si HJT	4,19813	$-5,40 \cdot 10^{-2}$	$1,79 \cdot 10^{-6}$	$4,04 \cdot 10^{-5}$	$-2,23 \cdot 10^{-2}$
Poli-Si Al-BSF	5,10895	$-5,96 \cdot 10^{-2}$	$2,15 \cdot 10^{-6}$	$5,15 \cdot 10^{-5}$	$-2,90 \cdot 10^{-2}$
CZTSSe	3,55328	$-4,89 \cdot 10^{-2}$	$1,67 \cdot 10^{-6}$	$3,31 \cdot 10^{-5}$	$-1,84 \cdot 10^{-2}$
CIGS	3,99239	$-5,38 \cdot 10^{-2}$	$1,67 \cdot 10^{-6}$	$3,77 \cdot 10^{-5}$	$-2,12 \cdot 10^{-3}$

Kao referentna osnova za usporedbu svih rezultata uzeta su dva modela za sve uvjete neba iz literature, Sandia SAPM i PVSPEC. Osim toga na slikama su prikazane pogreške u slučaju da se za svako mjerenje uzima standardni referentni spektar AM 1,5, odnosno da uzmemo da SF uvijek ima jediničnu vrijednost (bez SF modela). Na slikama 4.15 i 4.16 prikazane su vrijednosti MAE i wMAE predloženog modela za svih devet FN tehnologija. Klasična metrika MAE, u kojoj svaki vremenski korak ima jednaku težinu, pokazuje da je kod predloženog modela za tankoslojne tehnologije a-Si, CdTe i perovskit MAE niži u odnosu na PVSPEC za približno 15-20% (a-Si -19,7%; CdTe -14,9%; perovskit -16,4%). Za preostale FN tehnologije MAE ostaje vrlo blizu PVSPEC-a (CIGS -4,8%, CZTSSe -1,1%, mono-Si PERC: -2,8%, poli-Si -0,5%, mono-Si PERT -4,2%, HJT -3,8). U isto vrijeme, Sandia SAPM model ima veće MAE vrijednosti od PVSPEC-a za sve promatrane tehnologije, pa stoga predstavlja slabiji referentni model u pogledu neponderiranih apsolutnih pogrešaka. To sugerira da je u neponderiranoj mjeri apsolutne pogreške predloženi model posebno koristan za spektralno najosjetljivije tankoslojne tehnologije, uz minimalan gubitak preciznosti u odnosu na bolji od referentnih modela (PVSPEC) za ostale analizirane FN tehnologije.

Kada se pogreška ponderira trenutnim ukupnim ozračenjem (wMAE), prednost predloženog modela postaje konzistentna za sve tehnologije. U odnosu na PVSPEC, predloženi model ima niži wMAE za svih devet tehnologija, pri čemu su dobitci najizraženiji za tankoslojne tehnologije: za a-Si wMAE pada s 0,034 na 0,024 (-30,6%), za CdTe s 0,029 na 0,022 (-25,6%), a za perovskit s 0,031 na 0,023 (-27,4%). Za CIGS i CZTSSe wMAE je još niži, oko 4,7% odnosno 6,9%, dok se za kristalne silicijske tehnologije postižu smanjenja u rasponu 7-12% (mono-Si PERC -10,3%, poli-Si -7,5%, mono-Si PERT -11,8%, HJT -5,4%). U usporedbi sa Sandia SAPM modelom, smanjenja wMAE su još izraženija, jer Sandia u prosjeku pokazuje veće ozračenjem ponderirane pogreške od PVSPEC-a za sve tehnologije.



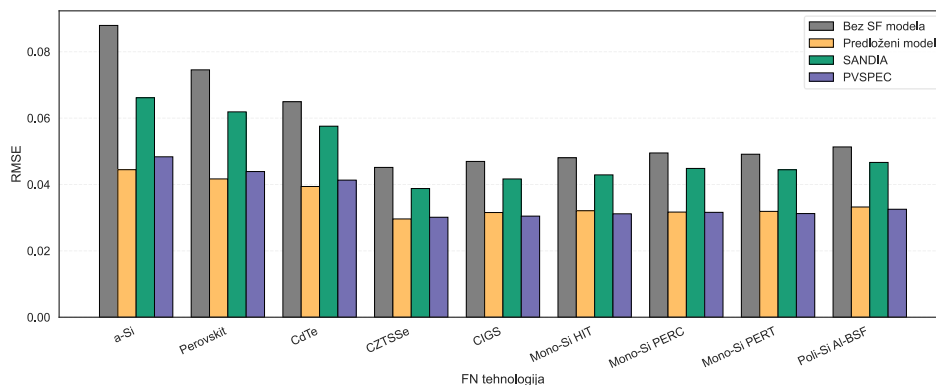
Slika 4.15 MAE predloženog modela i modela iz literature.



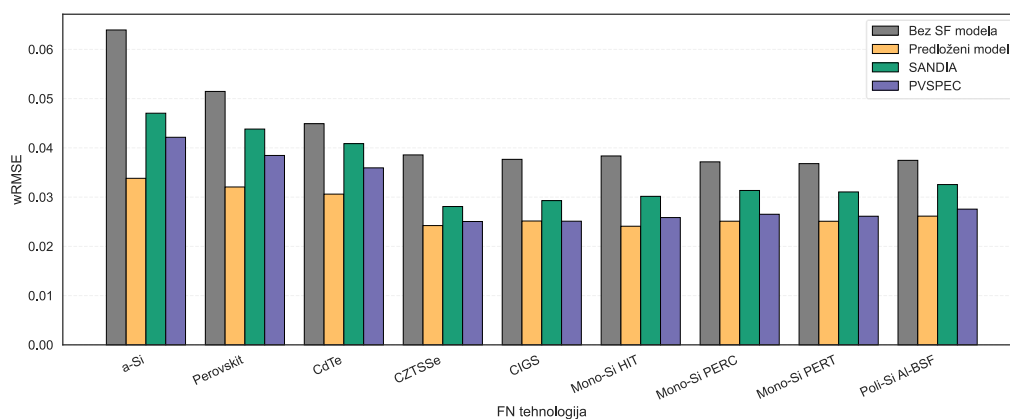
Slika 4.16 wMAE predloženog modela i modela iz literature.

Klasična metrika RMSE (slika 4.17) dodatno penalizira veće pojedinačne pogreške i pokazuje da predloženi model u odnosu na Sandia SAPM model ima konzistentno niži RMSE za svih devet FN tehnologija, u rasponu od približno 21 do 33% (a-Si -33%, CdTe -32%, perovskit -33%, kristalne Si tehnologije -23 do -27%). U usporedbi s PVSPEC-om, razlike su znatno manje: za spektralno najosjetljivije tankoslojne tehnologije a-Si, CdTe i perovskit RMSE je niži za 5-8% (a-Si -8,0%, CdTe -4,6%, perovskit -5,1%), dok je za dio kristalnih tehnologija RMSE predloženog modela vrlo blizu ili neznatno veći od PVSPEC-a (unutar +1-3%).

Kod RMSE rikazanog na slici 4.18 prednost predloženog modela postaje izražena, osobito u usporedbi sa Sandia SAPM modelom. U odnosu na Sandiu, wRMSE je niži za približno 14-27% preko svih tehnologija, pri čemu su dobitci najveći za tankoslojne tehnologije (a-Si -28%, CdTe -25%, perovskit -27%) te za neke kristalne tehnologije (poli-Si, PERT, HJT: oko -18-19%). U usporedbi s PVSPEC-om, predloženi model smanjuje wRMSE za većinu tehnologija, s tipičnim redukcijama od 2-5% za kristalne tehnologije i 15-20% za a-Si i perovskit, dok je razlika za CIGS praktički zanemariva. U cjelini, RMSE i wRMSE potvrđuju zaključak dobiven iz MAE i wMAE analize.



Slika 4.17 Srednja kvadratna pogreška predloženog modela i modela iz literature.

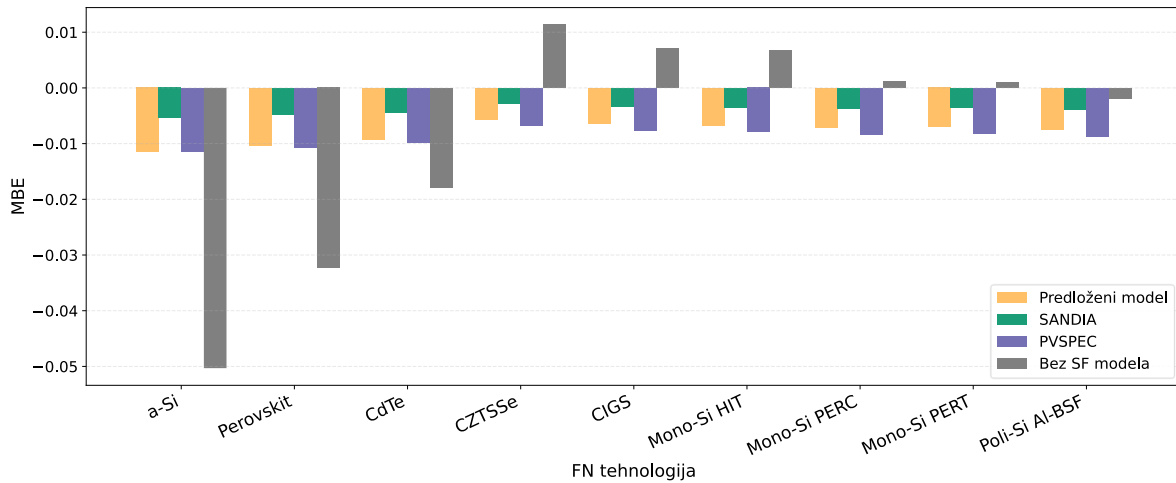


Slika 4.18 wRMSE predloženog modela i modela iz literature.

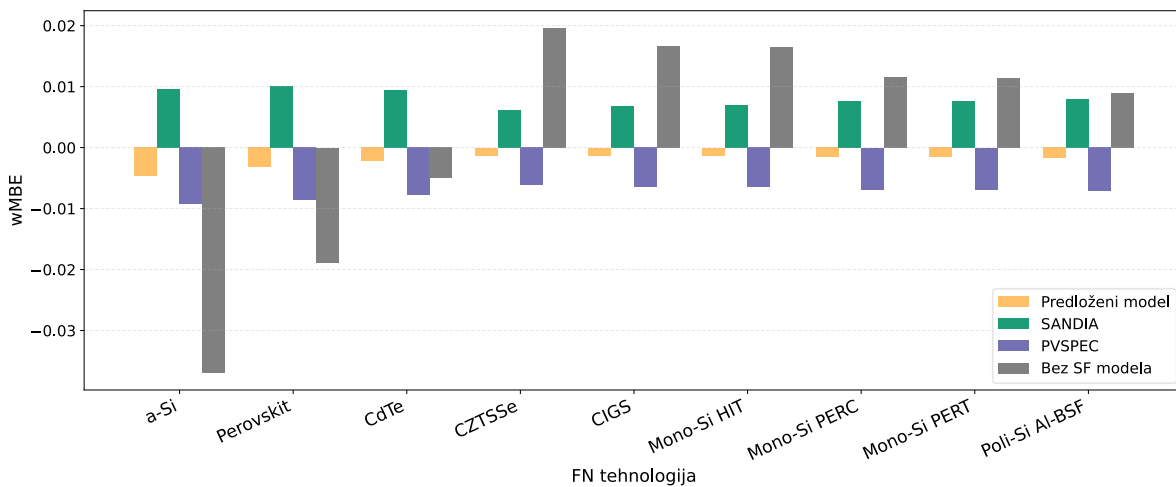
Dodatni uvid u ponašanje modela daje metrika pristranosti MBE prikazana na slici 4.19 i njezina ozračnjem ponderirana varijanta wMBE prikazana na slici 4.20. Neponderirana MBE, u kojoj svi vremenski koraci imaju jednaku težinu, na prvi pogled ide u prilog Sandia SAPM modelu: prosječna MBE Sandie iznosi -0,0039, što je bliže nuli od PVSPEC-a (-0,0088) i predloženog modela (-0,0079). Za većinu tehnologija Sandia pritom pokazuje najmanju apsolutnu MBE (npr. za a-Si -0,0054 u odnosu na -0,0115 kod predloženog modela i -0,0114 kod PVSPEC-a), što bi površno gledano sugeriralo da je Sandia gotovo „bez pristranosti“, dok predloženi model i PVSPEC imaju nešto veće, ali i dalje male negativne godišnje pristranosti u *SF-u*.

Međutim, neponderirana MBE podjednako zbraja pogreške u razdobljima vrlo male i vrlo velike proizvodnje, pa se kompenzacija dobitaka i gubitaka *SF-a* može dogoditi upravo u energetski najmanje značajnim trenucima. Kada se ista metrika ponderira ozračnjem (wMBE), slika se bitno mijenja: Sandia SAPM tada pokazuje najveću pozitivnu pristranost, s prosječnom wMBE $\approx +0,0080$, pri čemu su vrijednosti po tehnologijama u rasponu od +0,0061 do +0,0100. To znači da Sandia sustavno precjenjuje spektralni faktor i energetsku proizvodnju upravo u razdobljima visokog ozračenja. PVSPEC, naprotiv, ima negativnu wMBE za sve tehnologije (prosjeak $\approx -0,0073$), što upućuje na dosljedno podcjenjivanje energije u energetskim vršnim trenucima. Predloženi model pokazuje najujednačenije ponašanje: prosječna wMBE iznosi svega oko -0,0021, a pojedinačne vrijednosti po tehnologijama kreću se između -0,0047 (a-Si) i -0,0013 (CZTSSe, HJT), tj. više su od tri puta manje po apsolutnoj vrijednosti od PVSPEC-a i gotovo četiri puta manje od Sandie. U relativnom smislu, predloženi model ima nižu apsolutnu wMBE u odnosu na Sandiu za otprilike 120-150% (npr. a-Si s +0,0097 na -0,0047; CdTe: s +0,0094 na -0,0022; perovskit: s +0,0100 na -0,0032), a u odnosu na PVSPEC za oko 50-80%

(ovisno o tehnologiji). Time se pokazuje da se u predloženom modelu potencijalni dobici i gubici SF -a ne poništavaju artefaktom vremenskog prosjeka, nego su pristranosti minimizirane upravo u trenucima najveće proizvodnje FN sustava.



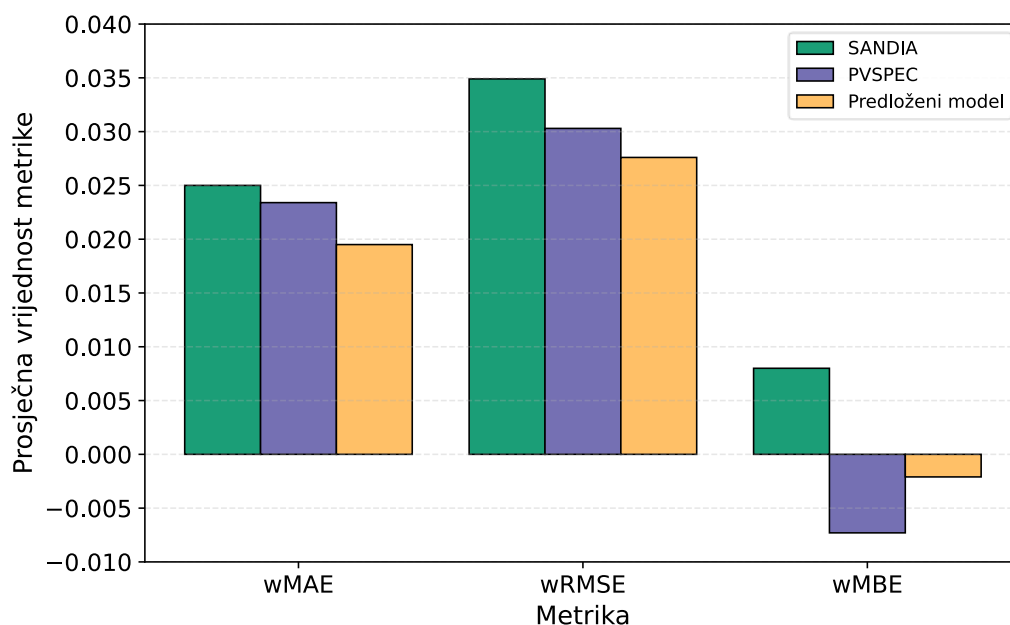
Slika 4.19 MBE predloženog modela i modela iz literature.



Slika 4.20 wMBE predloženog modela i modela iz literature.

Na slici 4.21 prikazan je prosjek evaluacijskih metrika po svim analiziranim FN tehnologijama. Gledano prosječno preko svih devet tehnologija wMAE je niža za približno 22% u odnosu na Sandiju i 17% u odnosu na PVSPEC, dok je wRMSE niža za oko 21% u odnosu na Sandiju i 9% u odnosu na PVSPEC.

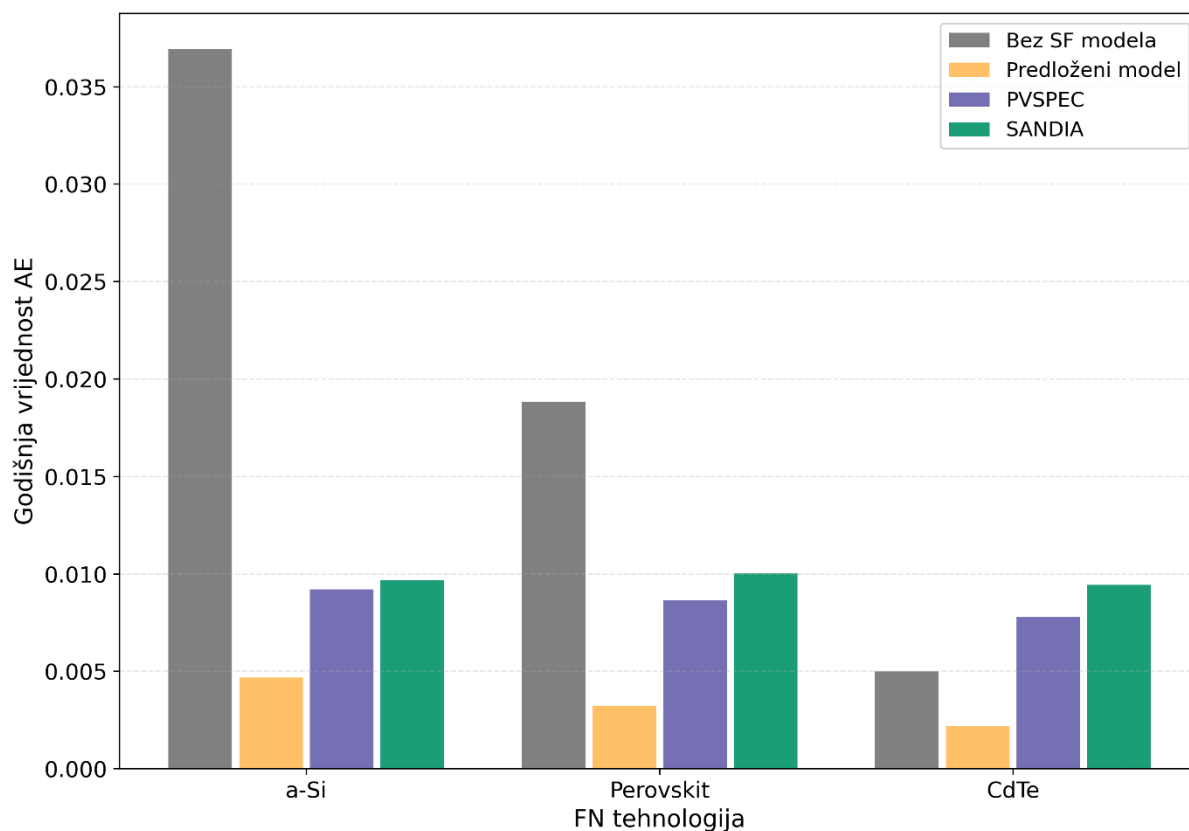
Budući da je godišnji energetske prinos ključna metrika i za projektiranje novih FN sustava i za dugoročnu procjenu rada postojećih postrojenja, u nastavku je prikazana godišnja apsolutna pogreška u izračunatom SF -u, ponderirana stvarnim profilom ozračenja. Na slikama 4.22 i 4.23



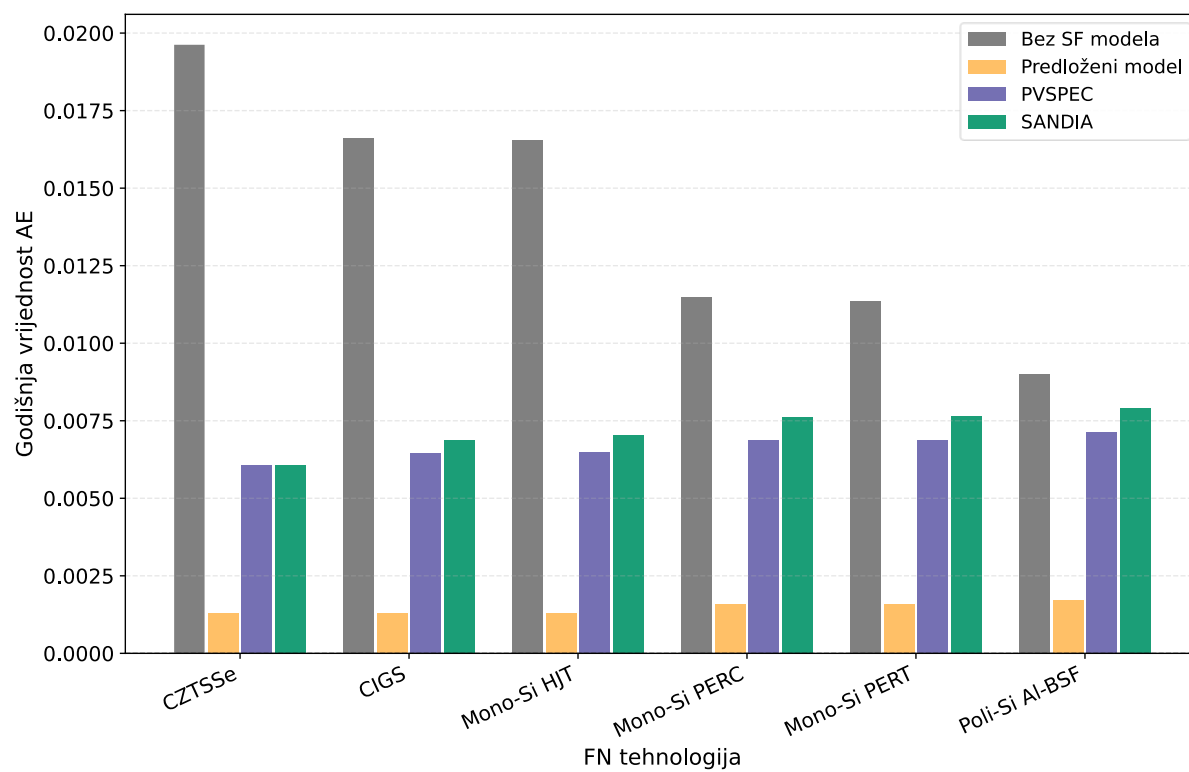
Slika 4.21 Prosjek evaluacijskih metrika po svim analiziranim FN tehnologijama.

prikazane su vrijednosti godišnjeg AE predloženog modela za svih devet FN tehnologija, zajedno s referentnim modelima iz literature Sandia SAPM i PVSPEC.

Za sve promatrane tehnologije predloženi model ostvaruje najmanji AE u odnosu na druga dva modela. Za a-Si je AE niži za oko 52% u odnosu na Sandia model i 49% u odnosu na PVSPEC; za CdTe je niži za približno 77% (Sandia) i 72% (PVSPEC), dok je za CIGS razlika još veća, oko 81% odnosno 80%. Za CZTSSe godišnji AE je niži za oko 79% u odnosu na oba referentna modela. Slično vrijedi i za kristalne silicijske tehnologije: za mono-Si PERC godišnja pogreška je manja za oko 79% u odnosu na Sandiu i 77% u odnosu na PVSPEC, za poli-Si za oko 78% odnosno 76%, za LG N-type oko 79% odnosno 77%, a za HJT približno 82% odnosno 80%. Za perovskit, kao treću spektralno najosjetljiviju tankoslojnu tehnologiju, AE se smanjuje za oko 68% u odnosu na Sandia model i 63% u odnosu na PVSPEC. Ovi rezultati pokazuju da predloženi model sustavno nadmašuje postojeće pristupe u trenutačnim energetskim metrikama, ali naročito uspješno minimizira ukupnu godišnju energetsku pogrešku uzrokovanu spektralnim varijacijama, što je presudno za pouzdane proračune energetskog prinosa.



Slika 4.22 Godišnja vrijednost AE za a-Si, perovskit i CdTe.



Slika 4.23 Godišnja vrijednost AE za tehnologije od kristalnog silicija, CZTSSe i CIGS.

U nastavku je analiza peterostruke unakrsne validacije foksuirana na varijabilnost između pojedinih dijelova (foldova) uključujući standardnu devijaciju i standardnu pogrešku kao mjere raspršenosti i nesigurnosti procjene srednje vrijednosti. Time se, uz nominalni iznos pogreške, procjenjuje i koliko su te pogreške stabilne na različite podjele podataka te kolika je pouzdanost procijenjenih srednjih vrijednosti metrika i regresijskih koeficijenata.

Za sve FN tehnologije MAE i RMSE su vrlo stabilne preko svih pet dijelova, a varijabilnost je manja od 1% srednje vrijednosti i to je prikazano u tablici 4.9. Relativne standardne devijacije MAE kreću se oko 0,54-0,67%, dok su za RMSE u rasponu približno 0,46-0,80%, što znači da se pogreške između različitih podjela podataka mijenjaju tek u trećoj decimali. Standardne pogreške (se %) su još manje (0,24-0,30% za MAE i 0,20-0,36% za RMSE), pa su same procjene srednjih MAE/RMSE vrlo precizne i malo ovise o konkretnoj realizaciji peterostruke unakrsne validacije. Gledano po tehnologijama, tankoslojne a-Si, perovskit i CdTe imaju najveće apsolutne MAE i RMSE, ali i dalje uz vrlo malu relativnu raspršenost, dok kristalne Si tehnologije i CZTSSe/CIGS pokazuju nešto niže MAE/RMSE uz slične ili malo veće RSD.

Za razliku od MAE i RMSE, metrika pristranosti MBE prikazana u tablici 4.10 pokazuje malo veće relativne standardne devijacije kroz dijelove, od 2,71% (a-Si) do 3,73% (CZTSSe), uz odgovarajuće standardne pogreške od 1,21% do 1,67%. Ova povećana relativna varijabilnost izravna je posljedica vrlo malih apsolutnih iznosa MBE (od -0,0057 do -0,0115). Naime, kada je nazivnik toliko malen, već minimalno apsolutno odstupanje između foldova rezultira naizgled velikom relativnom oscilacijom. U apsolutnom smislu model je stabilan, MBE je dosljedno negativna i veoma niska za sve tehnologije i sve foldove. To ukazuje na konzistentno blago podcjenjivanje faktora spektralne korekcije neovisno o konkretnoj podjeli podataka.

Tablica 4.8 Prosječna vrijednost MAE i RMSE te njihove standardne devijacije i srednje pogreške za predloženi model

FN tehnologija	MAE	RSD	RSE	RMSE	RSD	RSE
a-Si	0,0298	0,5894	0,2636	0,0455	0,4561	0,2040
Perovskit	0,0286	0,5719	0,2557	0,0427	0,4763	0,2130
CdTe	0,0274	0,5433	0,2430	0,0408	0,4782	0,2139
CZTSSe	0,0214	0,6656	0,2977	0,0316	0,8005	0,3580
CIGS	0,0225	0,6715	0,3003	0,0331	0,7753	0,3467
Mono-Si HJT	0,0230	0,6445	0,2882	0,0337	0,7480	0,3345
Mono-Si PERC	0,0234	0,6362	0,2845	0,0342	0,7192	0,3216
Mono-Si PERT	0,0233	0,6536	0,2923	0,0339	0,7415	0,3316
Poli-Si Al-BSF	0,0240	0,6055	0,2708	0,0350	0,6720	0,3005

Tablica 4.9 Prosječna vrijednost MBE te njegove standardne devijacije i srednje pogreške za predloženi model

FN tehnologija	MBE	RSD	RSE
a-Si	-0,0115	2,7126	1,2131
Perovskit	-0,01032	2,9311	1,3108
CdTe	-0,00923	3,1919	1,4275
CZTSSe	-0,00565	3,7268	1,6667
CIGS	-0,00633	3,3508	1,4985
Mono-Si HJT	-0,00669	3,2469	1,4521
Mono-Si PERC	-0,00713	3,1168	1,3939
Mono-Si PERT	-0,00701	3,1020	1,3872
Poli-Si Al-BSF	-0,00753	3,0918	1,3827

Prosječne vrijednosti wMAE su u rasponu 0,017-0,024, a wRMSE oko 0,025-0,034 za sve FN tehnologije i to je prikazano u tablici 4.11. RSD vrijednosti wMAE kreću se oko 0,54-0,61%, a za wRMSE oko 0,38-0,51%, dok su SE vrijednosti još manje (0,24-0,27% za wMAE i 0,17-0,23% za wRMSE). To znači da se ove metrike po pet dijelova mijenjaju tek u trećoj decimali, a pouzdanost procijenjenih srednjih vrijednosti je vrlo visoka. Relativne standardne devijacije i standardne pogreške za wMAE i wRMSE su niže nego za MAE i RMSE. Ozračanjem ponderirana metrika pristranosti wMBE prikazana je u tablici 4.12 i pokazuje još izražajnije relativne standardne devijacije nego neponderirana MBE, od 5,70% (a-Si) do čak 10,82% (Mono-Si HJT), uz standardne pogreške od 2,55% do 7,52%. Razlog je isti kao i kod MBE, ali još naglašeniji: apsolutni iznosi wMBE iznimno su mali, od -0,0013 (CZTSSe, CIGS, Mono-Si HJT) do -0,0047 (a-Si), pa već minimalno apsolutno odstupanje između dijelova u relativnom smislu izgleda veliko. U apsolutnom smislu model ostaje stabilan i konzistentan, wMBE je dosljedno negativna i vrlo bliska nuli za sve tehnologije i sve dijelove.

Tablica 4.10 Prosječna vrijednost wMAE i wRMSE te njihove standardne devijacije i srednje pogreške

FN tehnologija	wMAE	RSD	RSE	wRMSE	RSD	RSE
a-Si	0,0237	0,5373	0,2403	0,0338	0,3781	0,1691
Perovskit	0,0229	0,5587	0,2499	0,0321	0,4055	0,1813
CdTe	0,0218	0,5570	0,2491	0,0306	0,3892	0,1741
CZTSSe	0,0174	0,6007	0,2686	0,0252	0,5045	0,2256
CIGS	0,0183	0,6064	0,2712	0,0262	0,5029	0,2249
Mono-Si HJT	0,0186	0,5837	0,2610	0,0265	0,4845	0,2167
Mono-Si PERC	0,0190	0,5931	0,2653	0,0269	0,4957	0,2217
Mono-Si PERT	0,0189	0,6006	0,2686	0,0268	0,5053	0,2260
Poli-Si Al-BSF	0,0195	0,5867	0,2624	0,0274	0,4853	0,2170

Tablica 4.11 Prosječna vrijednost wMBE te njegove standardne devijacije i srednje pogreške

FN tehnologija	wMBE	RSD	RSE
a-Si	-0,0047	5,7026	2,5503
Perovskit	-0,0032	8,0574	3,6034
CdTe	-0,0022	9,4988	5,1424
CZTSSe	-0,0013	10,7894	7,5085
CIGS	-0,0013	10,6655	7,4530
Mono-Si HJT	-0,0013	10,8199	7,5221
Mono-Si PERC	-0,0016	9,9127	6,2219
Mono-Si PERT	-0,0016	9,7818	6,1634
Poli-Si Al-BSF	-0,0017	9,0478	5,8352

Za iznos godišnjeg AE prikazanog u tablici 4.13 vrijedi isto kao i kod wMBE. Apsolutni iznosi godišnjeg AE su iznimno mali, pa se čak i zanemariva apsolutna odstupanja između dijelova pretvaraju u naizgled visoke postotne vrijednosti. Važno je istaknuti da visoke relativne standardne devijacije ovdje nisu signal nestabilnosti modela, već je upravo suprotno potvrda da je model toliko dobro minimizirao godišnju energetska pogrešku da su preostale razlike između dijelova beznačajne.

Tablica 4.12 Prosječna vrijednost AE i njegove standardne devijacije i srednje pogreške

FN tehnologija	AE	RSD	RSE
a-Si	0,0047	5,7026	2,5503
Perovskit	0,0032	8,0574	3,6034
CdTe	0,0022	9,4988	5,1424
CZTSSe	0,0013	10,7894	7,5085
CIGS	0,0013	10,6655	7,4530
Mono-Si HJT	0,0013	10,8199	7,5221
Mono-Si PERC	0,0016	9,9127	6,2219
Mono-Si PERT	0,0016	9,7818	6,1634
Poli-Si Al-BSF	0,0017	9,0478	5,8352

Stabilnost koeficijenata kroz pet dijelova unakrsne validacije dodatno potvrđuje robusnost predloženog modela. U tablici 4.14 prikazane su vrijednosti koeficijenata β_0 i β_1 kao i njihove relativne standardne devijacije i standardne greške. U tablici 4.15 iste veličine su prikazane za koeficijente β_2 i β_3 , a u tablici 4.16 za koeficijent β_4 . Za svih devet FN tehnologija, svih pet koeficijenata relativne standardne devijacije kreću se između 0,47% i 1,46%, a standardne greške između 0,21% i 0,65%. To znači da se procijenjene vrijednosti između pojedinih foldova mijenjaju tek u trećoj ili kasnijoj decimalnoj znamenki. To isključuje mogućnost da hvatanje spektralnog utjecaja ovisi o slučajnoj podjeli mjernih podataka. Stabilnost koeficijenata i

stabilnost metrika pogreške zajedno potvrđuju da predloženi model uči fizikalno smislene odnose između atmosferskih veličina i faktora spektralne korekcije.

Tablica 4.13 Prosječne vrijednosti koeficijenata β_0 i β_1 te njihove relativne standardne devijacije i standardne greške

FN tehnologija	β_0	RSD	RSE	β_1	RSD	RSE
a-Si	9,7325	0,6867	0,3071	$-7,52 \cdot 10^{-2}$	0,5145	0,2301
Perovskit	8,3984	0,6534	0,2922	$-7,19 \cdot 10^{-2}$	0,5345	0,2390
CdTe	7,4805	0,6365	0,2846	$-6,37 \cdot 10^{-2}$	0,6137	0,2745
CZTSSe	3,5532	0,5654	0,2529	$-4,89 \cdot 10^{-2}$	0,8201	0,3668
CIGS	3,9924	0,4738	0,2119	$-5,38 \cdot 10^{-2}$	0,7319	0,3273
Mono-Si HJT	4,1981	0,4701	0,2102	$-5,40 \cdot 10^{-2}$	0,7234	0,3235
Mono-Si PERC	4,6333	0,4928	0,2204	$-5,83 \cdot 10^{-2}$	0,6615	0,2958
Mono-Si PERT	4,4476	0,4890	0,2187	$-5,91 \cdot 10^{-2}$	0,6534	0,2922
Poli-Si Al-BSF	5,1089	0,5126	0,2292	$-5,96 \cdot 10^{-2}$	0,6411	0,2867

Tablica 4.14 Prosječne vrijednosti koeficijenata β_2 i β_3 te njihove relativne standardne devijacije i standardne greške

FN tehnologija	β_2	RSD	RSE	β_3	RSD	RSE
a-Si	$3,88 \cdot 10^{-6}$	0,9335	0,4175	$1,10 \cdot 10^{-4}$	0,7115	0,3182
Perovskit	$3,72 \cdot 10^{-6}$	0,9281	0,4151	$9,33 \cdot 10^{-5}$	0,6880	0,3077
CdTe	$3,50 \cdot 10^{-6}$	0,9428	0,4216	$8,22 \cdot 10^{-5}$	0,6769	0,3027
CZTSSe	$1,67 \cdot 10^{-6}$	1,3982	0,6253	$3,31 \cdot 10^{-5}$	0,6761	0,3024
CIGS	$1,67 \cdot 10^{-6}$	1,4460	0,6467	$3,77 \cdot 10^{-5}$	0,5701	0,2550
Mono-Si HJT	$1,79 \cdot 10^{-6}$	1,3828	0,6184	$4,04 \cdot 10^{-5}$	0,5616	0,2512
Mono-Si PERC	$1,95 \cdot 10^{-6}$	1,3204	0,5905	$4,56 \cdot 10^{-5}$	0,5813	0,2599
Mono-Si PERT	$1,87 \cdot 10^{-6}$	1,3530	0,6051	$4,32 \cdot 10^{-5}$	0,5822	0,2603
Poli-Si Al-BSF	$2,15 \cdot 10^{-6}$	1,2532	0,5605	$5,15 \cdot 10^{-5}$	0,5938	0,2656

Tablica 4.15 Prosječne vrijednosti koeficijenta β_4 te njegova relativna standardna devijacija i standardna greška

FN tehnologija	β_4	RSD	RSE
a-Si	$-6,16 \cdot 10^{-2}$	0,7433	0,3324
Perovskit	$-5,23 \cdot 10^{-2}$	0,7188	0,3215
CdTe	$-4,61 \cdot 10^{-2}$	0,7085	0,3169
CZTSSe	$-1,84 \cdot 10^{-2}$	0,7345	0,3285
CIGS	$-2,12 \cdot 10^{-3}$	0,6053	0,2707
Mono-Si HJT	$-2,23 \cdot 10^{-2}$	0,5925	0,2650
Mono-Si PERC	$-2,56 \cdot 10^{-2}$	0,6089	0,2723
Mono-Si PERT	$-2,43 \cdot 10^{-2}$	0,6112	0,2733
Poli-Si Al-BSF	$-2,90 \cdot 10^{-2}$	0,6411	0,2867

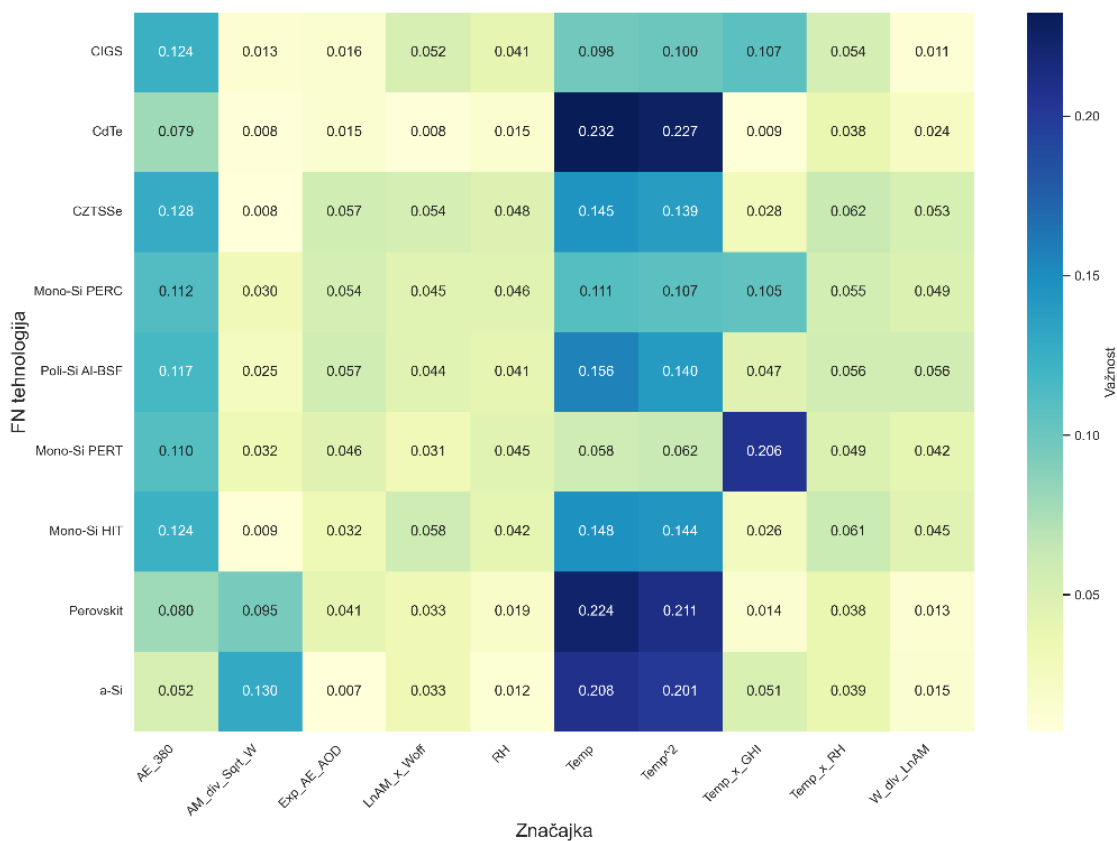
Male vrijednosti standardne devijacije i standardne pogreške metrika pokazuju da model nije slučajno dobio dobar rezultat na određenoj podjeli podataka, nego da se njegova izvedba reproducira na različitim podskupovima podataka. Isto vrijedi i za dobivene koeficijente: ako su srednje vrijednosti koeficijenata gotovo jednake kroz svih pet foldova, a njihove standardne devijacije male, to znači da je procijenjeni funkcionalni oblik fizikalno stabilan i da se ne mijenja značajno s promjenom uzorka; suprotno, veliki raspon koeficijenata po foldovima ukazivao bi na potencijalno pretreniranje.

4.5.3. Razvijeni modeli za uvjete vedrog neba

Za uvjete vedrog neba temperaturni profil atmosfere i dalje je važan, ali se ovdje pokazuje znatno kompleksnija slika, jer više različitih atmosferskih značajki postiže visoke vrijednosti relativne važnosti. U ovom slučaju pokazalo se da kombinacija značajki koje pojedinačno nisu uvijek među najjačima u konačnici daje najbolju performansu modela, pa se konačan izbor nije mogao temeljiti samo na pojedinačnom rangiranju značajki.

Kako bi se to sustavno obuhvatilo, provedeno je ispitivanje svih mogućih kombinacija značajki ograničeno na prvih 15 najvažnijih, pri čemu su testirane sve kombinacije s dvije do šest značajki. Za svaku kombinaciju analizirane su dobivene pogreške (MAE, RMSE, wMAE, wRMSE) te razine multikolinearnosti među značajkama, a zatim je za svaku FN tehnologiju odabran kompromisni model koji osigurava nisku pogrešku uz prihvatljivu stabilnost koeficijenata. Relativne važnosti prvih 10 najviše rangiranih značajki za sve tehnologije prikazane su toplinskom mapom na slici 4.24.

Na temelju tog postupka dobiven je jedinstven prijedlog jednadžbi sažet u tablici 4.17. Za tankoslojne tehnologije a-Si i perovskit predložen je isti tročlani model koji istovremeno opisuje raspršenje aerosola na kraćim valnim duljinama (Ångströmov eksponent) i osjetljivost na taložnu vodenu paru. Za CdTe je odabrana zasebna jednadžba koja naglašava ulogu vodene pare i vlažnosti zraka u spektralnoj modulaciji. Za preostalih šest tehnologija (mono-Si PERC, mono-Si PERT, mono-Si HJT, poli-Si Al-BSF, CZTSSe i CIGS) usvojena je zajednička forma koja kombinira taložnu vodenu paru, Ångströmov eksponent i kvadrat temperature modula.



Slika 4.24 Toplinska mapa važnosti značajki za vedro nebo.

Tablica 4.16 Predložene analitičke jednadžbe za modele vedrog neba.

FN tehnologija	Jednadžba modela
a-Si	$\beta_0 + \beta_1 \frac{AM_a}{\sqrt{W}} + \beta_2 e^{AOD \cdot AE} + \beta_3 T$
Perovskit	
CdTe	$\beta_0 + \beta_1 (W \cdot RH) + \beta_2 AE + \beta_3 T^2$
Mono-Si PERC	$\beta_0 + \beta_1 \frac{W}{\ln AM_a} + \beta_2 AE + \beta_3 T^2$
Mono-Si PERT	
Mono-Si HJT	
Poli-Si Al-BSF	
CZTSSe	
CIGS	

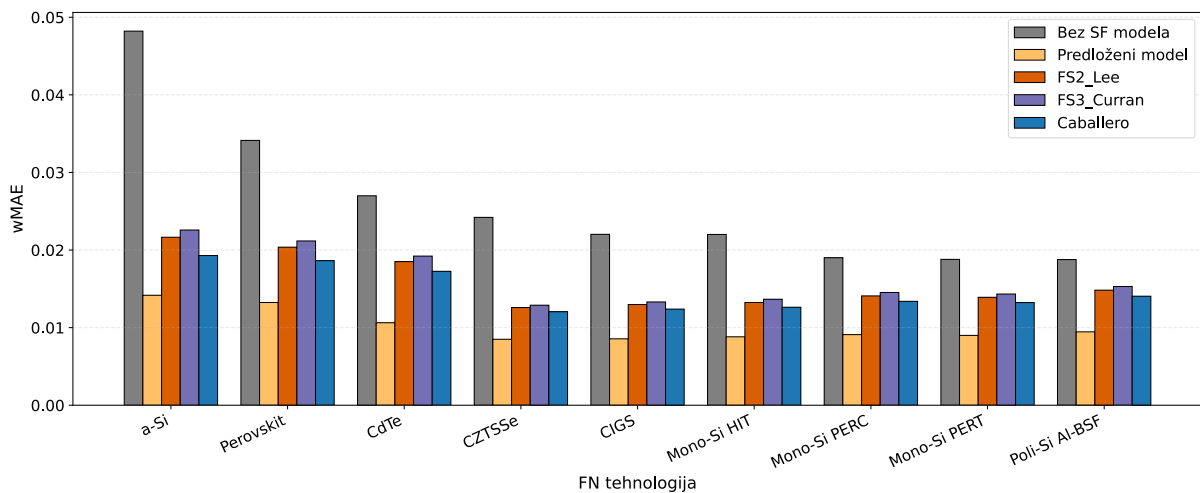
4.5.4. Peterostruka unakrsna validacija za modele vedrog neba

Za uvjete vedrog neba razvijeni su zasebni modeli koji, uz osnovne geometrijske i meteorološke varijable, eksplicitno uključuje taložnu vodenu paru W , optičku dubinu aerosola AOD i Ångströmov eksponent AE dobivene iz mjerenja filtarskim radiometrom (AERONET mreža). Takav pristup omogućuje detaljniji opis spektralnih promjena uzrokovanih varijabilnošću vodene pare i aerosola, ali je njegova praktična primjena ograničena na lokacije gdje su dostupna pouzdana, kontinuirana mjerenja ovih varijabli, odnosno gdje je moguće integrirati postojeću AERONET ili sličnu infrastrukturu u sustav predviđanja rada FN sustava. U ovom dijelu analizirani su rezultati peterostruke unakrsne validacije predloženog modela i uspoređeni s dostupnim modelima iz literature za vedro nebo, pri čemu se kao referentna osnova uzimaju modeli FS2 i FS3 te Caballerov $AM-W-AOD$ model. Kao i u analizi za sve uvjete neba, promatraju se energetske relevantne ozračenjem ponderirane metrike $wMAE$, $wRMSE$ i $wMBE$ te godišnja AE metrika. Neponderirane metrike nisu uključene jer je razlika između standardnih i ozračenjem ponderiranih metrika u uvjetima vedrog neba vrlo mala, što je i fizikalno očekivano jer se većina mjerenja pri vedrom nebu odvija pri relativno visokom i stabilnom globalnom ozračenju, pa su vremenski koraci s niskim razinama G energetske zanemarivi i ponderiranje gotovo ne mijenja raspodjelu pogreške u odnosu na neponderirani slučaj. Konačni dobiveni koeficijenti za modele za uvjete vedrog neba prikazani su u tablici 4.18.

Tablica 4.17 Dobiveni koeficijenti za model za vedro nebo.

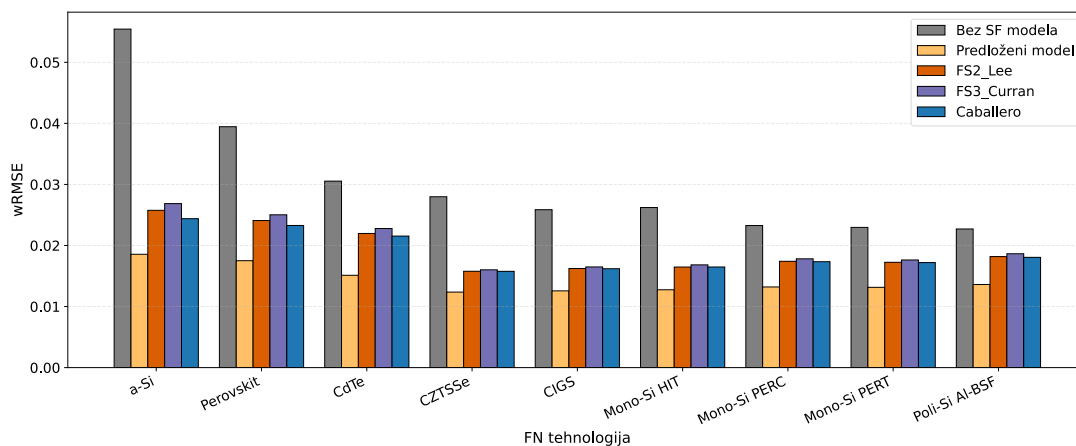
FN tehnologija	β_0	β_1	β_2	β_3
a-Si	0,45266	$-3,25 \cdot 10^{-2}$	$10,8 \cdot 10^{-2}$	$1,78 \cdot 10^{-3}$
Perovskit	0,43929	$-2,41 \cdot 10^{-2}$	$8,5 \cdot 10^{-2}$	$1,80 \cdot 10^{-3}$
CdTe	0,72814	$2,91 \cdot 10^{-4}$	$-1,27 \cdot 10^{-2}$	$3,14 \cdot 10^{-6}$
Mono-Si PERC	0,83143	$3,31 \cdot 10^{-4}$	$-1,21 \cdot 10^{-2}$	$1,87 \cdot 10^{-6}$
Mono-Si PERT	0,84031	$3,54 \cdot 10^{-4}$	$-1,23 \cdot 10^{-2}$	$1,76 \cdot 10^{-6}$
Mono-Si HJT	0,83305	$2,12 \cdot 10^{-4}$	$-1,21 \cdot 10^{-2}$	$1,76 \cdot 10^{-6}$
Poli-Si Al-BSF	0,81837	$3,66 \cdot 10^{-4}$	$-1,23 \cdot 10^{-2}$	$2,05 \cdot 10^{-6}$
CZTSSe	0,83551	$1,76 \cdot 10^{-4}$	$-1,16 \cdot 10^{-2}$	$1,75 \cdot 10^{-6}$
CIGS	0,84801	$1,98 \cdot 10^{-4}$	$-1,20 \cdot 10^{-2}$	$1,63 \cdot 10^{-6}$

Kod ponderirane srednje apsolutne pogreške wMAE prikazane na slici 4.25, prednost predloženog modela za uvjete vedrog neba nad referentnim modelima iz literature postaje izrazito jasna za svih devet FN tehnologija. U odnosu na Caballerov model, wMAE je niža za približno 26,5% za a-Si (s 0,0193 na 0,0142), oko 38,4% za CdTe (s 0,0173 na 0,0106) te oko 32,8% za perovskit (s 0,0197 na 0,0132), dok je za za CIGS i CZTSSe niža za 30-32% (CIGS: 0,0124 prema 0,0086; CZTSSe: 0,0120 prema 0,0085). Za kristalne silicijske tehnologije postižu se relativna vrijednosti wMAE su niže od otprilike 33% za mono-Si PERC (0,0134 prema 0,0091), 33% za poli-Si (0,0141 prema 0,0095), 32% za mono-Si PERT (0,0132 prema 0,0090) i 32% za HJT (0,0130 prema 0,0088). U odnosu na FS2 i FS3, sva ova razlike su još izraženije, budući da oba First Solar modela u pravilu ostvaruju veće wMAE od Caballerova modela za sve promatrane tehnologije.



Slika 4.25 Ponderirana srednja apsolutna pogreška predloženog modela za vedro nebo i modela iz literature.

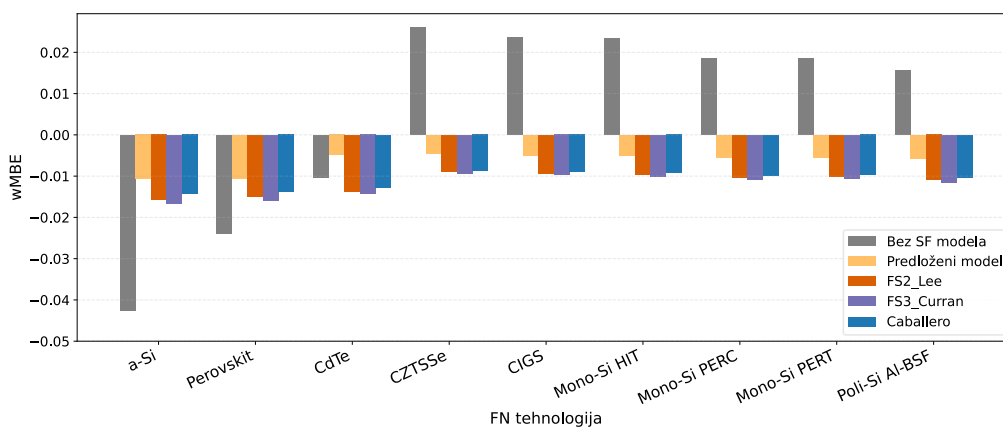
Za wRMSE prikazan na slici 4.26, koji dodatno jače penalizira veće pojedinačne pogreške, predloženi model vedrog neba također pokazuje bolje rezultate. U odnosu na Caballerov model, wRMSE je niži za oko 23,9% za a-Si (0,0244 prema 0,0186), približno 29,8% za CdTe (0,0215 prema 0,0151) te oko 28,1% za perovskit (0,0244 prema 0,0175), dok su smanjenja za CIGS i CZTSSe reda 22-24% (CIGS: 0,0162 prema 0,0126; CZTSSe: 0,0158 prema 0,0124). Za kristalne tehnologije wRMSE je niži za približno 24% za mono-Si PERC (0,0173 prema 0,0132), 24-25% za poli-Si (0,0181 prema 0,0136) te oko 23-25% za mono-Si PERT i HJT (0,0172 prema 0,0131 i 0,0170 prema 0,0128), pri čemu FS2 i FS3 pokazuju još veće wRMSE vrijednosti od Caballerova modela u gotovo svim slučajevima. U cjelini, RMSE i wRMSE u analizi za vedro nebo potvrđuju iste zaključke kao i wMAE.



Slika 4.26 Ponderirana srednja kvadratna pogreška predloženog modela za vedro nebo i modela iz literature.

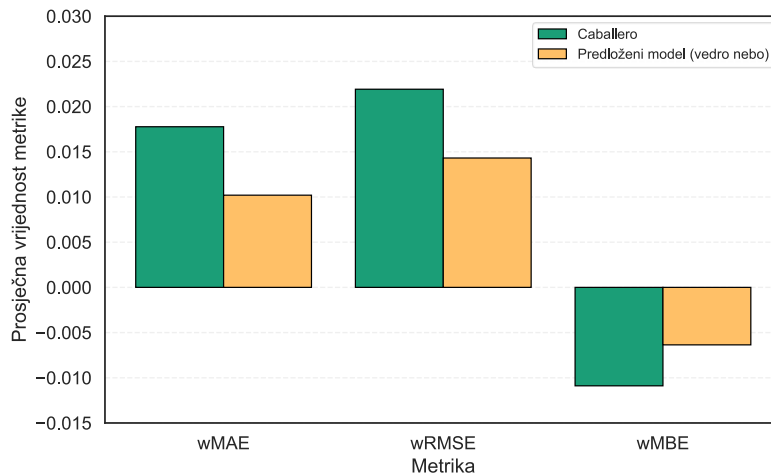
Pristranost modela za uvjete vedrog neba najbolje se vidi na ozračjenjem ponderiranoj metrici wMBE prikazanoj na slici 4.27. Kod modela iz literature (FS2, FS3 i Caballerov model) wMBE je za većinu tehnologija reda veličine -0,01, dok je kod predloženog modela približno dvostruko manja, reda veličine -0,005, što znači da se apsolutna pristranost spektralnog faktora prepolovila. Primjerice, za mono-Si PERC wMBE se smanjuje s oko -0,010 na oko -0,0055, odnosno otprilike za 45%, za poli-Si s oko -0,010 na -0,0057 (također približno 45%), dok se za CIGS i CZTSSe tipične vrijednosti smanjuju s -0,009 na -0,005 (reda 40-45% relativnog smanjenja).

Za tankoslojne tehnologije dobici su jednako izraženi: za CdTe wMBE je niža otprilike -0,013 na -0,0049 (smanjenje reda 60%), a za a-Si i perovskit s vrijednosti oko -0,014 na oko -0,010 odnosno -0,0105 (smanjenje reda 25-30%). U prosjeku, preko svih devet tehnologija apsolutna vrijednost wMBE predloženog modela iznosi približno polovinu odgovarajuće vrijednosti Caballerova modela, pri čemu FS2 i FS3 dodatno pokazuju nešto veće negativne pristranosti.



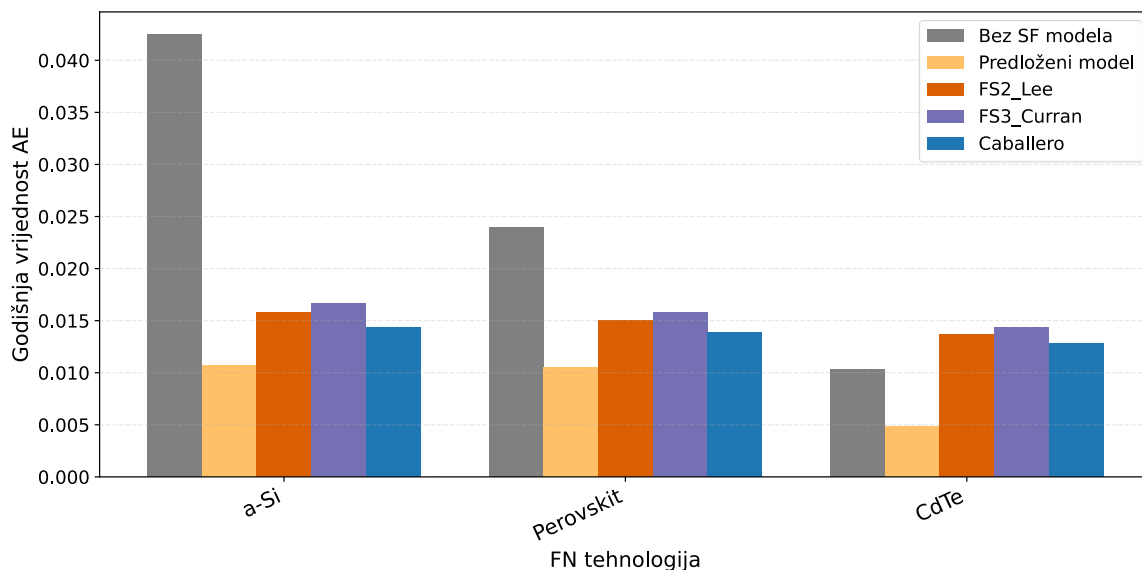
Slika 4.27 wMBE predloženog modela za vedro nebo i modela iz literature.

Gledano prosječno preko svih devet tehnologija na slici 4.28, wMAE se smanjuje s 0,01777 na 0,01020, što odgovara relativnom smanjenju od oko 43% u odnosu na Caballerov model. Istodobno wRMSE pada s 0,02192 na 0,01431, tj. za približno 35%, pa predloženi model za uvjete vedrog neba značajno reducira i tipičnu kvadratnu pogrešku u energetskim vršnim trenucima. Ozračanjem ponderirana pristranost wMBE smanjuje se s -0,01089 na -0,00636 (otprilike 42% manje po apsolutnoj vrijednosti), što pokazuje da predloženi model ne samo da smanjuje raspršenje pogrešaka, nego i sustavnu podcjenu spektralne korekcije u clear-sky uvjetima.

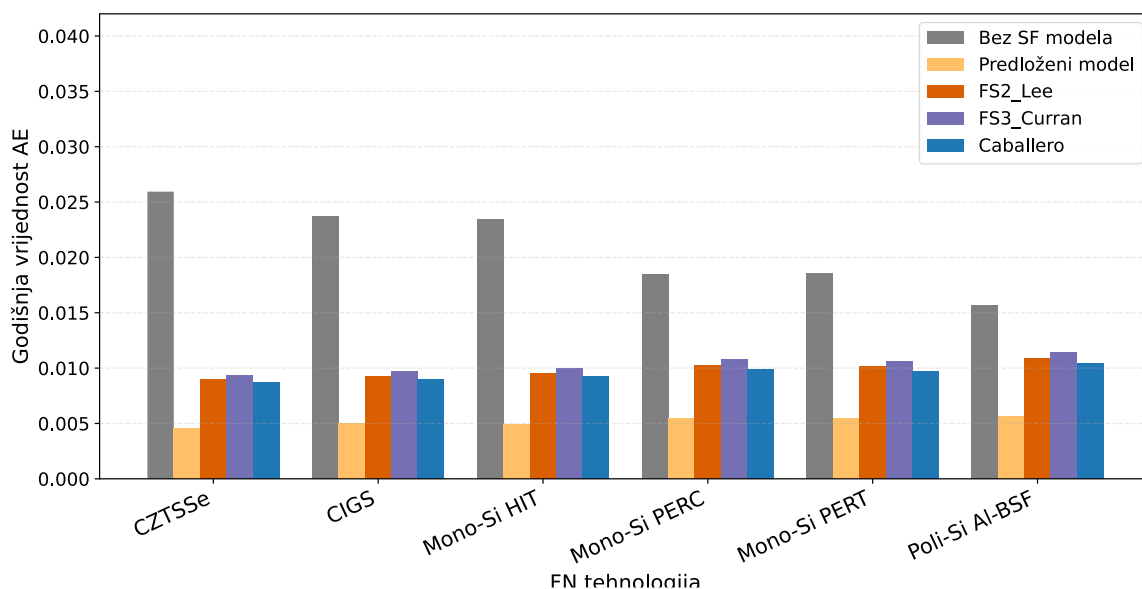


Slika 4.28 Prosjek ponderiranih pogrešaka po FN tehnologijama za predloženi model vedrog neba i Caballerov model.

Za godišnji AE prikazane na slikama 4.29 i 4.30 predloženi model vedrog neba također pokazuje niže rezultate. U odnosu na Caballerov model, godišnji AE je niži za oko 25,3% za a-Si (0,01434 prema 0,01072), približno 62,1% za CdTe (0,01279 prema 0,00485) te oko 24,2% za perovskit (0,01387 prema 0,01052), dok su smanjenja za CIGS i CZTSSe reda 44-48% (CIGS: 0,00903 prema 0,00502; CZTSSe: 0,00874 prema 0,00456). Za kristalne tehnologije godišnji AE je niži za približno 44,8% za mono-Si PERC (0,00988 prema 0,00545), oko 45,6% za poli-Si (0,01041 prema 0,00566) te oko 43,6-46,5% za mono-Si PERT i HJT (0,00974 prema 0,00549 i 0,00924 prema 0,00494), pri čemu FS2 i FS3 pokazuju još veće godišnje AE vrijednosti od Caballerova modela u gotovo svim slučajevima. U cjelini, godišnji AE u analizi za vedro nebo potvrđuje iste zaključke kao i wMAE i wRMSE.



Slika 4.29 Godišnja vrijednost AE za a-Si, perovskit i CdTe za modele vedrog neba.



Slika 4.30 Godišnja vrijednost AE za tehnologije od kristalnog silicija, CZTSSe i CIGS za modele vedrog neba.

Kao i za model za sve uvjete neba, uz nominalne vrijednosti metrika i koeficijenta modela vedrog neba provedena je i analiza varijabilnosti između pojedinih dijelova peterostruke unakrsne validacije. Prosječne vrijednosti wMAE za model vedrog neba prikazane su u tablici 4.19 i kreću se u rasponu 0,0085-0,0142. Za wRMSE vrijednosti se kreću u rasponu 0,0124-0,0186 i prikazane su u tablici 4.20 za sve FN tehnologije, što su nešto niže vrijednosti nego za model svih uvjeta neba. To je očekivano s obzirom na homogeniji skup atmosferskih uvjeta. Relativne standardne devijacije wMAE iznose svega $1,22 \cdot 10^{-40}$ % do $1,68 \cdot 10^{-40}$ %, a za wRMSE $2,36 \cdot 10^{-40}$ % do $2,63 \cdot 10^{-40}$ %, uz standardne pogreške još nekoliko puta manje. Ovako niske

vrijednosti relativnih standardnih devijacija, za nekoliko redova veličine manje nego kod modela za sve uvjete neba, ukazuju na iznimnu stabilnost modela vedrog neba kroz dijelove validacije. To je očekivano jer skup podataka vedrog neba karakteriziraju homogeniji i manje varijabilni atmosferski uvjeti, pa su razlike između pojedinih dijelova minimalne. Ozračanjem ponderirana metrika pristranosti wMBE prikazana u tablici 4.20 kreće se od -0,0046 (CZTSSe) do -0,0107 (a-Si), uz relativne standardne devijacije od $2,18 \cdot 10^{-4}\%$ do $4,20 \cdot 10^{-4}\%$ i standardne pogreške od $0,97 \cdot 10^{-4}\%$ do $1,88 \cdot 10^{-4}\%$. Kao i kod modela za sve uvjete neba, wMBE je dosljedno negativna za sve tehnologije i sve foldove.

Tablica 4.18 Prosječna vrijednost wMAE i wRMSE te njihove standardne devijacije i srednje pogreške za modele vedrog neba

FN tehnologija	wMAE	RSD	RSE	wRMSE	RSD	RSE
a-Si	0,0142	$1,51 \cdot 10^{-4}$	$6,75 \cdot 10^{-5}$	0,0186	$2,36 \cdot 10^{-4}$	$1,06 \cdot 10^{-4}$
Perovskit	0,0132	$1,54 \cdot 10^{-4}$	$6,89 \cdot 10^{-5}$	0,0175	$2,53 \cdot 10^{-4}$	$1,13 \cdot 10^{-4}$
CdTe	0,0106	$1,68 \cdot 10^{-4}$	$7,49 \cdot 10^{-5}$	0,0151	$2,63 \cdot 10^{-4}$	$1,17 \cdot 10^{-4}$
CZTSSe	0,0085	$1,22 \cdot 10^{-4}$	$5,45 \cdot 10^{-5}$	0,0124	$2,49 \cdot 10^{-4}$	$1,11 \cdot 10^{-4}$
CIGS	0,0086	$1,22 \cdot 10^{-4}$	$5,45 \cdot 10^{-5}$	0,0126	$2,47 \cdot 10^{-4}$	$1,10 \cdot 10^{-4}$
Mono-Si HJT	0,0088	$1,24 \cdot 10^{-4}$	$5,54 \cdot 10^{-5}$	0,0128	$2,47 \cdot 10^{-4}$	$1,09 \cdot 10^{-4}$
Mono-Si PERC	0,0091	$1,30 \cdot 10^{-4}$	$5,82 \cdot 10^{-5}$	0,0132	$2,44 \cdot 10^{-4}$	$1,09 \cdot 10^{-4}$
Mono-Si PERT	0,0090	$1,28 \cdot 10^{-4}$	$5,75 \cdot 10^{-5}$	0,0131	$2,44 \cdot 10^{-4}$	$1,09 \cdot 10^{-4}$
Poli-Si Al-BSF	0,0095	$1,33 \cdot 10^{-4}$	$5,96 \cdot 10^{-5}$	0,0136	$2,43 \cdot 10^{-4}$	$1,09 \cdot 10^{-4}$

Tablica 4.19 Prosječna vrijednost wMBE te njegove standardne devijacije i srednje pogreške za modele vedrog neba

FN tehnologija	wMBE	RSD	RSE
a-Si	-0,0107	$4,20 \cdot 10^{-4}$	$1,88 \cdot 10^{-4}$
Perovskit	-0,0105	$3,96 \cdot 10^{-4}$	$1,77 \cdot 10^{-4}$
CdTe	-0,0079	$2,30 \cdot 10^{-4}$	$1,03 \cdot 10^{-4}$
CZTSSe	-0,0046	$2,23 \cdot 10^{-4}$	$0,99 \cdot 10^{-4}$
CIGS	-0,0050	$2,18 \cdot 10^{-4}$	$0,97 \cdot 10^{-4}$
Mono-Si HJT	-0,0049	$2,27 \cdot 10^{-4}$	$1,02 \cdot 10^{-4}$
Mono-Si PERC	-0,0055	$2,34 \cdot 10^{-4}$	$1,05 \cdot 10^{-4}$
Mono-Si PERT	-0,0055	$2,27 \cdot 10^{-4}$	$1,02 \cdot 10^{-4}$
Poli-Si Al-BSF	-0,0057	$2,50 \cdot 10^{-4}$	$1,12 \cdot 10^{-4}$

Tablica 4.20 Prosječna vrijednost AE i njegove standardne devijacije i srednje pogreške

FN tehnologija	AE	RSD	RSE
a-Si	0,0107	$4,20 \cdot 10^{-4}$	$1,88 \cdot 10^{-4}$
Perovskit	0,0105	$3,96 \cdot 10^{-4}$	$1,77 \cdot 10^{-4}$
CdTe	0,0079	$2,30 \cdot 10^{-4}$	$1,03 \cdot 10^{-4}$
CZTSSe	0,0046	$2,23 \cdot 10^{-4}$	$0,99 \cdot 10^{-4}$
CIGS	0,0050	$2,18 \cdot 10^{-4}$	$0,97 \cdot 10^{-4}$
Mono-Si HJT	0,0049	$2,27 \cdot 10^{-4}$	$1,02 \cdot 10^{-4}$
Mono-Si PERC	0,0055	$2,34 \cdot 10^{-4}$	$1,05 \cdot 10^{-4}$
Mono-Si PERT	0,0055	$2,27 \cdot 10^{-4}$	$1,02 \cdot 10^{-4}$
Poli-Si Al-BSF	0,0057	$2,50 \cdot 10^{-4}$	$1,12 \cdot 10^{-4}$

Stabilnost koeficijenta kroz pet dijelova unakrsne validacije dodatno potvrđuje robusnost predloženog modela. U tablici 4.22 prikazane su vrijednosti koeficijenta β_0 i β_1 kao i njihove relativne standardne devijacije i standardne greške. U tablici 4.23 iste veličine su prikazane za koeficijente β_2 i β_3 . Za svih devet FN tehnologija, relativne standardne devijacije koeficijenta β_0 kreću se između 0,069% i 0,247%, a za β_1 između 0,0013% i 0,016%, dok su za β_2 u rasponu 0,011-0,042% te za β_3 između 0,00082% i 0,00079%. Standardne greške pokazuju sličnu stabilnost: za β_0 kreću se između 0,00247% (sve kristalne tehnologije) i 0,110% (a-Si), za β_1 između 0,000114% i 0,0073%, za β_2 od 0,0051% do 0,019%, dok su za β_3 u rasponu od 0,00037% do 0,00038%. To znači da se procijenjene vrijednosti između pojedinih foldova mijenjaju tek u trećoj ili kasnijoj decimalnoj znamenici.

Tablica 4.21 Prosječne vrijednosti koeficijenta β_0 i β_1 te njihove relativne standardne devijacije i standardne greške

FN tehnologija	β_0	RSD	RSE	β_1	RSD	RSE
a-Si	0,4527	$2,47 \cdot 10^{-3}$	$1,10 \cdot 10^{-3}$	$-3,25 \cdot 10^{-2}$	$1,63 \cdot 10^{-4}$	$7,29 \cdot 10^{-5}$
Perovskit	0,4393	$1,94 \cdot 10^{-3}$	$2,47 \cdot 10^{-3}$	$-2,41 \cdot 10^{-2}$	$1,62 \cdot 10^{-4}$	$7,25 \cdot 10^{-5}$
CdTe	0,7281	$8,35 \cdot 10^{-4}$	$2,47 \cdot 10^{-3}$	$2,91 \cdot 10^{-2}$	$2,56 \cdot 10^{-6}$	$1,14 \cdot 10^{-6}$
CZTSSe	0,8355	$7,02 \cdot 10^{-4}$	$2,47 \cdot 10^{-3}$	$1,76 \cdot 10^{-2}$	$1,24 \cdot 10^{-5}$	$5,53 \cdot 10^{-6}$
CIGS	0,8480	$6,97 \cdot 10^{-4}$	$2,47 \cdot 10^{-3}$	$1,98 \cdot 10^{-2}$	$1,25 \cdot 10^{-5}$	$5,58 \cdot 10^{-6}$
Mono-Si HJT	0,8331	$7,12 \cdot 10^{-4}$	$2,47 \cdot 10^{-3}$	$2,12 \cdot 10^{-2}$	$1,27 \cdot 10^{-5}$	$5,68 \cdot 10^{-6}$
Mono-Si PERC	0,8314	$6,95 \cdot 10^{-4}$	$2,47 \cdot 10^{-3}$	$3,31 \cdot 10^{-2}$	$1,27 \cdot 10^{-5}$	$5,70 \cdot 10^{-6}$
Mono-Si PERT	0,8403	$6,94 \cdot 10^{-4}$	$2,47 \cdot 10^{-3}$	$2,47 \cdot 10^{-3}$	$1,27 \cdot 10^{-5}$	$5,66 \cdot 10^{-6}$
Poli-Si Al-BSF	0,8184	$7,04 \cdot 10^{-4}$	$2,47 \cdot 10^{-3}$	$3,66 \cdot 10^{-3}$	$1,29 \cdot 10^{-5}$	$5,77 \cdot 10^{-6}$

Tablica 4.22 Prosječne vrijednosti koeficijenata β_2 i β_3 te njihove relativne standardne devijacije i standardne greške

FN tehnologija	β_2	RSD	RSE	β_3	RSD	RSE
a-Si	0,1075	$4,00 \cdot 10^{-4}$	$1,79 \cdot 10^{-4}$	$1,78 \cdot 10^{-3}$	$7,90 \cdot 10^{-6}$	$3,53 \cdot 10^{-6}$
Perovskit	0,0846	$4,20 \cdot 10^{-4}$	$1,88 \cdot 10^{-4}$	$1,80 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{-6}$	$2,86 \cdot 10^{-6}$
CdTe	-0,0127	$1,24 \cdot 10^{-4}$	$5,56 \cdot 10^{-5}$	$3,15 \cdot 10^{-6}$	$1,04 \cdot 10^{-8}$	$4,67 \cdot 10^{-9}$
CZTSSe	-0,0116	$1,13 \cdot 10^{-4}$	$5,08 \cdot 10^{-5}$	$1,75 \cdot 10^{-6}$	$8,36 \cdot 10^{-9}$	$3,74 \cdot 10^{-9}$
CIGS	-0,0120	$1,16 \cdot 10^{-4}$	$5,18 \cdot 10^{-5}$	$1,63 \cdot 10^{-6}$	$8,27 \cdot 10^{-9}$	$3,70 \cdot 10^{-9}$
Mono-Si HJT	-0,0120	$1,17 \cdot 10^{-4}$	$5,24 \cdot 10^{-5}$	$1,80 \cdot 10^{-6}$	$8,49 \cdot 10^{-9}$	$3,80 \cdot 10^{-9}$
Mono-Si PERC	-0,0121	$1,22 \cdot 10^{-4}$	$5,46 \cdot 10^{-5}$	$1,87 \cdot 10^{-6}$	$8,29 \cdot 10^{-9}$	$3,71 \cdot 10^{-9}$
Mono-Si PERT	-0,0121	$1,21 \cdot 10^{-4}$	$5,43 \cdot 10^{-5}$	$1,76 \cdot 10^{-6}$	$8,23 \cdot 10^{-9}$	$3,68 \cdot 10^{-9}$
Poli-Si Al-BSF	-0,0123	$1,26 \cdot 10^{-4}$	$5,63 \cdot 10^{-5}$	$2,05 \cdot 10^{-6}$	$8,46 \cdot 10^{-9}$	$3,78 \cdot 10^{-9}$

4.6. Rezultati validacije modela

U ovom poglavlju provedena je analiza i rasprava o točnosti i stabilnosti razvijenih modela spektralne korekcije za oba atmosferska režima. Razmatrane su sve korištene metrike, uključujući usporedbu primjenom peterostruke unakrsne validacije, validaciju na pojedinačnim lokacijama i validaciju na neovisnom skupu podataka. Za oba atmosferska režima (svi uvjeti neba i vedro nebo) rezultati predloženih modela uspoređeni su s rezultatima referentnih modela iz literature. Koeficijenti svih modela iz literature pritom su ponovno prilagođeni na istom skupu podataka korištenom za treniranje predloženih modela, umjesto da se koriste izvorni koeficijenti iz literature, čime je osigurana najpravednija moguća usporedba.

Standardne metrike (MAE, RMSE, MBE) u ovom su radu uključene prvenstveno radi ilustracije i usporedbe na primjeru peterostruke unakrsne validacije za model za sve uvjete neba, jer podjednako tretiraju sve vremenske korake tijekom godine i stoga nisu fizikalno relevantne, za razliku od ozračanjem ponderiranih metrika.

4.6.1. Validacija na pojedinačnim lokacijama za model za sve uvjete neba

Do sada prikazani rezultati temelje se na peterostrukoj unakrsnoj validaciji, pri kojoj je skup podataka sustavno podijeljen na podskupove za treniranje i testiranje, čime se osigurava robusna statistička procjena generalizacijske sposobnosti modela. Ipak, kako bi se dodatno potvrdila pouzdanost razvijenih modela u realnim radnim uvjetima, provedena je i validacija na svakoj od pojedine tri lokacije te na neovisnom skupu podataka (poglavlje 4.5.3) koji nije ni na koji način bio uključen u proces razvoja ili prilagodbe koeficijenata modela. Za tu svrhu prije peterostruke unakrsne validacije 20% podataka sa svake lokacije ostavljen je za validaciju na pojedinoj loakciji. Validacija po pojedinim lokacijama i neovisnom skupu podataka

omogućuje uvid koji prosječna metrika unakrsne validacije ne može pružiti: koliko se pogreške razlikuju između lokacija s različitim klimatskim i atmosferskim karakteristikama te postoji li sustavna pristranost modela prema određenoj klimatskoj zoni.

Rezultati validacije na pojedinim lokacijama otkrivaju nekoliko jasnih i konzistentnih obrazaca koji pružaju uvid u generalizacijsku sposobnost predloženog modela izvan skupa podataka korištenog za treniranje. Promatrano po prosječnim metrikama kroz svih devet FN tehnologija, predloženi model ostvaruje prosječnu wMAE od 0,0190 za Almeriju, 0,0172 za Golden i 0,0247 na Lindenbergu. Omjer prosječnih wMAE između Lindenberga i Almerije za predloženi model iznosi 1,30, a između Lindenberga i Goldena 1,43, dakle greška na Lindenbergu je u prosjeku 30-43% veća, što je znatno manji raspon od onog koji pokazuje Sandia model ($L/A = 1,64$), dok PVSPEC pokazuje jedinstven obrazac, jedini je model kojemu je prosječna wMAE na Lindenbergu manja nego na Almeriji ($L/A = 0,97$), uz povećanje u odnosu na Golden ($L/G = 1,28$), što dijelom objašnjava zašto dominira upravo na toj lokaciji. Ova usporedba omjera posebno je indikativna: dok Sandia model pokazuje izrazito neravnomjernu prostornu distribuciju pogreške, predloženi model zadržava relativno ujednačenu razinu točnosti i na lokaciji s najzahtjevnijim atmosferskim uvjetima.

Analiza ranga modela po lokaciji za metrike wMAE i wRMSE daje identičan i posebno jasan uvid u konzistentnost predloženog modela. Na lokaciji Almeria predloženi model postiže najmanju wMAE i wRMSE za svih devet FN tehnologija, na lokaciji Golden za osam od devet tehnologija, dok na lokaciji Lindenberg PVSPEC pokazuje najmanju wMAE i wRMSE za šest od devet tehnologija, a predloženi model za preostale tri. Važno je pritom naglasiti da Sandia model ne postiže prvo mjesto ni na jednoj lokaciji ni za jednu tehnologiju ni po jednoj od promatranih metrika, što ga svrstava na posljednje mjesto u ovoj usporedbi.

Relativna poboljšanja predloženog modela u odnosu na referentne modele variraju po lokacijama na karakterističan i fizikalno interpretabilan način. U odnosu na Sandiu, predloženi model smanjuje prosječnu wMAE za 25,2% za Almeriju, 51,1% za Golden i 40,8% na Lindenbergu, a wRMSE za 18,7%, 40,5% i 29,2% redom. Poboljšanja su konzistentna na svim lokacijama i za sve tehnologije. U odnosu na PVSPEC, poboljšanja su izražena na Almeriji (wMAE -28,4%, wRMSE -16,9%) i Goldenu (wMAE -14,5%, wRMSE -6,9%), dok su na Lindenbergu minimalna (wMAE -4,6%, wRMSE -2,4%), što je u skladu s činjenicom da PVSPEC na toj lokaciji daje bolje rezultate od predloženog modela za šest od devet tehnologija.

Razlika između tankoslojnih i kristalnih tehnologija posebno je izražena na lokaciji Golden, gdje predloženi model ima niži wMAE za 57,0% u odnosu na Sandiu i 25,6% u odnosu na

PVSPEC za tankoslojne tehnologije, dok za kristalne tehnologije niži u odnosu na PVSPEC pada za 6,0%. Na Almeriji su također niže vrijednosti za tankoslojne tehnologije s nešto manjom razlikom, ali i dalje vrlo izražena (vs Sandia -27,5%, vs PVSPEC -37,8%), dok su za kristalne tehnologije poboljšanja u odnosu na oba referentna modela ujednačenija. Na Lindenbergu su niže vrijednosti metrika u odnosu na Sandiu konzistentna za obje grupe tehnologija (~40-42%), no u odnosu na PVSPEC predloženi model za kristalne tehnologije ima više vrijednosti, ali jako slične (wMAE +3,2%, wRMSE +2,2%). Ovaj rezultat nije iznenađujući s obzirom na to da Lindenberg raspolaže najmanjim brojem mjernih podataka, pa izdvojenih 20% za validaciju čini skup 2,6 puta manji od Goldena i 2,8 puta manji od Almerije, što može narušiti reprezentativnost procjene upravo za atmosferske uvjete koji su specifični za tu lokaciju. Osim toga, velik broj oblačnih dana daje važnst K_t varijabli na kojoj se PVSPEC bazira pa nije iznenađujući ovaj rezultat.

Analiza pristranosti wMBE otkriva još jedan važan i prostorno konzistentan obrazac. Na lokaciji Almeria sva tri modela pokazuju dosljedno negativnu wMBE za sve tehnologije, što upućuje na sustavno blago podcjenjivanje faktora spektralne korekcije u uvjetima visoke razine ozračenja karakteristične za mediteransku klimu. Na lokacijama Golden i Lindenberg wMBE je pozitivna za sve tehnologije i sve modele, što znači da svi modeli u tim uvjetima sustavno precjenjuju SF . Predloženi model pritom postiže najmanju apsolutnu wMBE za Almeriju (0,0046 naspram 0,0057 za Sandiu i 0,0162 za PVSPEC) i za Golden (0,0052 naspram 0,0215 za Sandiu i 0,0105 za PVSPEC). Jedina iznimka je lokacija Lindenberg, gdje PVSPEC postiže jednaku apsolutnu wMBE kao za Golden (0,0105), dok predloženi model bilježi 0,0126 te za svih 9 tehnologija PVSPEC ima manju apsolutnu wMBE od predloženog modela, što je konzistentno s već opisanom dominacijom PVSPEC-a na toj lokaciji. Sandia model pritom pokazuje daleko najveću apsolutnu wMBE na svim lokacijama, posebno za Golden (0,0215) i Lindenbergu (0,0283). Ovi rezultati zajedno potvrđuju da predloženi model ne samo da minimizira trenutačne i godišnje energetske pogreške, već to čini uz prostorno konzistentnu i minimaliziranu pristranost na svim lokacijama osim Lindenberga, gdje specifičnost i ograničena veličina validacijskog skupa otežavaju jednoznačnu interpretaciju. Ipak, i u Lindenbergu predloženi model dominira kad su tankoslojne tehnologije u pitanju, ali su generalno sva tri modela imaju najveća odstupanja u Lindenbergu.

Tablica 4.23 Usporedba evaluacijskih metrika za predloženi model i modele iz literature za validaciju na pojedinačnim lokacijama

FN tehn.	Lok.	Predloženi model			SANDIA			PVSPEC		
		wMAE	wRMSE	wMBE	wMAE	wRMSE	wMBE	wMAE	wRMSE	wMBE
a-Si	A	0,0227	0,0332	-0,0055	0,0327	0,0415	-0,008	0,0383	0,0450	-0,0362
	G	0,0201	0,0312	0,0043	0,0479	0,0570	0,0321	0,0293	0,0373	0,0195
	L	0,0277	0,0387	0,0135	0,0478	0,0579	0,0327	0,0338	0,0445	0,0140
Pvskt	A	0,0221	0,0314	-0,0043	0,0301	0,0387	-0,0068	0,0355	0,0414	-0,0335
	G	0,0196	0,0290	0,0060	0,0460	0,0530	0,0305	0,0256	0,0331	0,0183
	L	0,0269	0,0377	0,0127	0,0470	0,0559	0,0322	0,0316	0,0411	0,0119
CdTe	A	0,0215	0,0310	-0,0039	0,0287	0,0366	-0,0057	0,0328	0,0385	-0,0308
	G	0,0191	0,0280	0,0065	0,0428	0,0495	0,0282	0,0241	0,0314	0,0175
	L	0,0254	0,0360	0,0107	0,0436	0,0519	0,0296	0,0297	0,0386	0,0100
CZTSSe	A	0,0175	0,0248	-0,0025	0,0219	0,0284	-0,0037	0,0206	0,0260	-0,0055
	G	0,0168	0,0244	0,0041	0,0258	0,0326	0,0139	0,0173	0,0247	0,0060
	L	0,0221	0,0322	0,0092	0,0371	0,0434	0,0241	0,0219	0,0318	0,0081
CIGS	A	0,0183	0,0256	-0,0031	0,0224	0,0293	-0,0034	0,0208	0,0262	-0,0057
	G	0,0177	0,0251	0,0048	0,0285	0,0354	0,0158	0,0135	0,0247	0,0056
	L	0,0236	0,0327	0,0102	0,0388	0,0447	0,0261	0,0222	0,0319	0,0096
Mono-Si HJT	A	0,0166	0,0228	-0,0048	0,0229	0,0297	-0,0056	0,0216	0,0270	-0,0074
	G	0,0161	0,0232	0,0050	0,0298	0,0367	0,0170	0,0174	0,0241	0,0063
	L	0,0237	0,0329	0,0136	0,0388	0,0447	0,0264	0,0229	0,0320	0,0098
Mono-Si PERC	A	0,0173	0,0236	-0,0056	0,0232	0,0303	-0,0059	0,0229	0,0281	-0,0088
	G	0,0162	0,0233	0,0052	0,0317	0,0384	0,0184	0,0179	0,0242	0,0069
	L	0,0242	0,0333	0,0144	0,0405	0,0464	0,0277	0,0235	0,0326	0,0106
Mono-Si PERT	A	0,0172	0,0234	-0,0055	0,0231	0,0301	-0,0057	0,0223	0,0276	-0,0082
	G	0,0161	0,0231	0,0051	0,0312	0,0379	0,0178	0,0174	0,0239	0,0063
	L	0,0242	0,0334	0,0144	0,0408	0,0467	0,0277	0,0236	0,0325	0,0106
Poli-Si	A	0,0179	0,0242	-0,0062	0,0237	0,0310	-0,0064	0,0243	0,0294	-0,0095
	G	0,0166	0,0236	0,0056	0,0335	0,0400	0,0200	0,0189	0,0249	0,0082
	L	0,0245	0,0336	0,0151	0,0412	0,0472	0,0283	0,0238	0,0331	0,0109

Tablica 4.24 Broj prvih mjesta za evaluacijske metrike svakog od modela za sve tri lokacije

Metrika	Lokacija	Predloženi model	SANDIA	PVSPEC
wMAE	Almeria	9/9	0/9	0/9
	Golden	8/9	0/9	1/9
	Lindenberg	3/9	0/9	6/9
wRMSE	Almeria	9/9	0/9	0/9
	Golden	8/9	0/9	1/9
	Lindenberg	3/9	0/9	6/9
wMBE	Almeria	9/9	0/9	0/9
	Golden	9/9	0/9	0/9
	Lindenberg	0/9	0/9	9/9

Tablica 4.25 Usporedba metrika predloženog modela i modela iz literature

Lokacija	Skupina tehnologija	wMAE vs SANDIA (%)	wMAE vs PVSPEC (%)	wRMSE vs SANDIA (%)	wRMSE vs PVSPEC (%)	wMBE (abs) vs SANDIA (%)	wMBE (abs) vs PVSPEC (%)
Almeria	a-Si, CdTe, Perovskit	27,5%	37,8%	18,2%	23,5%	33,2%	86,4%
Almeria	Ostale FN tehnologije	23,6%	20,9%	19,2%	12,1%	9,8%	38,6%
Almeria	Prosjek svih tehnologija	25,2%	28,4%	18,8%	17,0%	19,1%	71,6%
Golden	a-Si, CdTe, Perovskit	57,0%	25,6%	44,7%	13,4%	81,5%	69,6%
Golden	Ostale FN tehnologije	44,9%	2,8%	35,4%	2,6%	71,0%	24,2%
Golden	Prosjek svih tehnologija	50,1%	12,7%	39,3%	7,0%	75,9%	50,7%
Lindenberg	a-Si, CdTe, Perovskit	42,2%	15,9%	32,2%	9,5%	61,0%	-6,0%
Lindenberg	Ostale FN tehnologije	40,0%	-3,2%	27,5%	-2,2%	52,0%	-29,0%
Lindenberg	Prosjek svih tehnologija	40,8%	4,6%	29,2%	2,4%	55,3%	-20,6%

Kako bi se dodatno kvantificirala prostorna konzistentnost predloženog modela, izračunana je standardna devijacija metrika između lokacija što je prikazano u tablici 4.21. Standardna devijacija između sve tri lokacije za predloženi model iznosi u prosjeku 0,0038 za wMAE i 0,0049 za wRMSE, dok Sandia bilježi znatno veće vrijednosti (0,0086 za wMAE i 0,0082 za wRMSE). PVSPEC pokazuje prosječnu SD wMAE od 0,0037 i SD wRMSE od 0,0041, dakle gotovo identične vrijednosti kao predloženi model, što na prvi pogled sugerira usporedivu prostornu konzistentnost. Međutim, promatrano po skupinama tehnologija, situacija je drugačija. Za tankoslojne tehnologije predloženi model postiže nižu SD wMAE (0,0036) od PVSPEC-a (0,0046), dok je za preostalih šest tehnologija situacija obrnuta, tu PVSPEC ima SD wMAE od 0,0032 naspram 0,0039 za predloženi model. Slično vrijedi i za wRMSE: za tankoslojne je SD predloženog modela 0,0041 naspram 0,0044 za PVSPEC, dok za ostale tehnologije predloženi model bilježi 0,0053 naspram 0,0040 za PVSPEC. Za metriku pristranosti wMBE predloženi model i PVSPEC su gotovo identični u prosjeku (0,0045 vs 0,0049), dok Sandia bilježi daleko najveću SD (0,0119). Ukupno gledano, predloženi model i PVSPEC pokazuju sličnu prostornu konzistentnost kada se u analizu uključe sve tri lokacije, no ova sličnost prikriva razliku u strukturi varijabilnosti između tehnologija.

Ovaj zaključak zahtijeva pažljiviju interpretaciju. Lindenberg kao lokacija s dominantno oblačnim uvjetima i specifičnim spektralnim karakteristikama sustavno generira veće apsolutne vrijednosti metrika za sva tri modela, što neminovno povećava SD računatu između svih triju

lokacija. Kada se iz analize isključi Lindenberg i promatra samo par lokacija Almeria-Golden, razlika između modela postaje znatno jasnija i to je prikazano u tablici 4.21. Predloženi model postiže prosječnu SD wMAE od svega 0,0010 između Almerije i Goldena, što je više od četiri puta manje od PVSPEC-a (0,0045) i sedam puta manje od Sandie (0,0070). Za wRMSE razlika je još izrazitija: SD predloženog modela iznosi svega 0,0008, naspram 0,0032 za PVSPEC i 0,0067 za Sandiu. Ova prednost posebno dolazi do izražaja za tankoslojne tehnologije, gdje predloženi model postiže SD wMAE od 0,0018 između Almerije i Goldena, gotovo četiri puta manje od PVSPEC-a (0,0065) i šest puta manje od Sandie (0,0107), ali je jednako izražena i za kristalne tehnologije, gdje SD wMAE predloženog modela iznosi svega 0,0006, naspram 0,0035 za PVSPEC i 0,0051 za Sandiu.

Tablica 4.26 Standardna devijacija metrike za sve tri promatrane lokacije

	wMAE			wRMSE			wMBE		
	Predloženi (1)	SANDIA (2)	PVSPEC (3)	1	2	3	1	2	3
a-Si	0,0039	0,0087	0,0045	0,0039	0,0092	0,0043	0,0050	0,0141	0,0120
Perovskit	0,0037	0,0095	0,0050	0,0045	0,0092	0,0047	0,0044	0,0142	0,0111
CdTe	0,0032	0,0084	0,0044	0,0040	0,0082	0,0041	0,0034	0,0134	0,0105
CZTSSe	0,0029	0,0079	0,0024	0,0044	0,0077	0,0038	0,0035	0,0102	0,0014
CIGS	0,0032	0,0083	0,0047	0,0043	0,0078	0,0038	0,0037	0,0114	0,0023
Mono-Si HJT	0,0043	0,0080	0,0029	0,0057	0,0075	0,0040	0,0050	0,0104	0,0018
Mono-Si PERC	0,0043	0,0087	0,0031	0,0057	0,0081	0,0042	0,0052	0,0109	0,0019
Mono-Si PERT	0,0044	0,0089	0,0033	0,0059	0,0083	0,0043	0,0053	0,0110	0,0022
Poli-Si	0,0042	0,0088	0,0030	0,0056	0,0081	0,0041	0,0053	0,0111	0,0014
Prosjek	0,0038	0,0086	0,0037	0,0049	0,0082	0,0041	0,0045	0,0119	0,0050

Tablica 4.27 Standardna devijacija metrike za lokacije Golden i Almeriju

	wMAE			wRMSE			wMBE		
	Predloženi (1)	SANDIA (2)	PVSPEC (3)	1	2	3	1	2	3
a-Si	0,0018	0,0107	0,0064	0,0014	0,0110	0,0054	0,0008	0,0170	0,0118
Perovskit	0,0018	0,0112	0,0070	0,0017	0,0101	0,0059	0,0012	0,0168	0,0107
CdTe	0,0017	0,0100	0,0062	0,0021	0,0091	0,0050	0,0018	0,0159	0,0094
CZTSSe	0,0005	0,0028	0,0023	0,0003	0,0030	0,0009	0,0011	0,0072	0,0004
CIGS	0,0004	0,0043	0,0052	0,0004	0,0043	0,0011	0,0012	0,0088	0,0001
Mono-Si HJT	0,0004	0,0049	0,0030	0,0003	0,0049	0,0021	0,0001	0,0081	0,0008
Mono-Si PERC	0,0008	0,0060	0,0035	0,0002	0,0057	0,0028	0,0003	0,0088	0,0013
Mono-Si PERT	0,0008	0,0057	0,0035	0,0002	0,0055	0,0026	0,0003	0,0086	0,0013
Poli-Si	0,0009	0,0069	0,0038	0,0004	0,0064	0,0032	0,0004	0,0096	0,0009
Prosjek	0,0010	0,0069	0,0045	0,0008	0,0067	0,0032	0,0008	0,0112	0,0041

Promatrano po tehnologijama, predloženi model postiže posebno nisku SD wMAE između Almerije i Goldena za kristalne silicijske tehnologije od svega 0,0004 (Mono-Si HJT) do 0,0009 (Poli-Si) što znači da se wMAE između te dvije lokacije razlikuje tek u četvrtoj decimalnoj znamenki. Za tankoslojne tehnologije SD je nešto veća (0,0017-0,0018), ali i dalje znatno niža od referentnih modela. Uključivanjem Lindenberga SD predloženog modela raste na 0,0032-0,0046, no ovo povećanje nije specifično za predloženi model jer sva tri modela pokazuju usporedivo povećanje SD kada se Lindenberg uključi u analizu, što potvrđuje da je Lindenberg inherentno zahtjevnija lokacija, a ne da predloženi model na njoj specifično gubi konzistentnost.

Ovi rezultati zajedno pokazuju da predloženi model postiže iznimno ujednačenu prostornu točnost između lokacija sličnih klimatskih karakteristika. Veća SD u analizi svih triju lokacija ponajviše je posljedica klimatske specifičnosti Lindenberga (veći broj oblačnih dana), a vrlo vjerojatno i ograničenog validacijskog skupa, a ne indikacija stvarne lokacijske osjetljivosti modela.

Godišnja apsolutna pogreška (AE) izravno kvantificira ukupnu pogrešku u procjeni godišnje energetske proizvodnje FN sustava. Predloženi model postiže najmanji prosječni AE na Almeriji (0,0046 naspram 0,0057 za Sandiu i 0,0162 za PVSPEC) i za Golden (0,0052 naspram 0,0215 za Sandiu i 0,0105 za PVSPEC), gdje osvaja prvo mjesto za svih devet FN tehnologija na obje lokacije. Na lokaciji Lindenberg situacija je obrnuta, PVSPEC postiže najmanji AE za svih 9 tehnologija (0,0105), dok predloženi model bilježi 0,0126, a Sandia daleko najveći AE

(0,0283). Evaluacijske metrike su niže kod predloženog modela u odnosu na Sandiu za sve lokacije i tehnologije: za Almeriju prosječno 19,1%, za Golden 75,9% i za Lindenberg 55,3%. U odnosu na PVSPEC poboljšanja su izražena na Almeriji (71,6%) i Goldenu (50,7%), dok na Lindenbergu predloženi model bilježi veći AE od PVSPEC-a za 20,6% u prosjeku i to konzistentno za svih 9 tehnologija.

Prostorna konzistentnost godišnjeg AE predloženog modela potvrđuje zaključke dobivene analizom wMBE. Standardna devijacija AE između sve tri lokacije iznosi prosječno 0,0045 za predloženi model što je malo bolje nego PVSPEC (0,0049), a Sandia bilježi daleko veću SD od 0,0119. Kada se iz analize isključi Lindenberg i promatra samo par Almeria-Golden, prednost predloženog modela postaje izrazita: SD AE predloženog modela iznosi svega 0,0008, što je više od pet puta manje od PVSPEC-a (0,0041) i četrnaest puta manje od Sandie (0,0112). Za tankoslojne tehnologije SD AE predloženog modela između Almerije i Goldena iznosi 0,0013, gotovo osam puta manje od Sandie (0,0166) i osam puta manje od PVSPEC-a (0,0107), dok za kristalne tehnologije SD iznosi svega 0,0006, što je zanemarivo u usporedbi sa Sandijom (0,0085) i PVSPEC-om (0,0008). Ovi rezultati potvrđuju da predloženi model minimizira godišnju energetska pogrešku na prostorno konzistentan način za sve FN tehnologije i na svim lokacijama osim Lindenerga, gdje specifičnost atmosferskih uvjeta i ograničena veličina validacijskog skupa pogoduju PVSPEC-u čija funkcionalna forma bolje odgovara oblačnim uvjetima.

Tablica 4.28 Usporedba godišnjih AE vrijednosti za predloženi model i modele iz literature za validaciju na pojedinačnim lokacijama

FN tehn.	Lok.	Godišnji AE		
		Predloženi model	SANDIA	PVSPEC
a-Si	A	0,0055	0,0080	0,0362
	G	0,0043	0,0321	0,0195
	L	0,0135	0,0327	0,0129
Pvskt	A	0,0043	0,0068	0,0335
	G	0,0060	0,0305	0,0183
	L	0,0127	0,0322	0,0119
CdTe	A	0,0039	0,0057	0,0308
	G	0,0065	0,0282	0,0175
	L	0,0107	0,0296	0,0100
CZTSSe	A	0,0025	0,0037	0,0055
	G	0,0041	0,0139	0,0060
	L	0,0092	0,0241	0,0081
CIGS	A	0,0031	0,0034	0,0057

	G	0,0048	0,0158	0,0056
	L	0,0102	0,0261	0,0096
	A	0,0048	0,0056	0,0074
Mono-Si HJT	G	0,0050	0,0170	0,0063
	L	0,0136	0,0264	0,0098
	A	0,0056	0,0059	0,0088
Mono-Si PERC	G	0,0052	0,0184	0,0069
	L	0,0144	0,0277	0,0106
	A	0,0055	0,0057	0,0082
Mono-Si PERT	G	0,0051	0,0178	0,0063
	L	0,0144	0,0277	0,0106
	A	0,0062	0,0064	0,0095
Poli-Si	G	0,0056	0,0200	0,0082
	L	0,0151	0,0283	0,0109

Tablica 4.29 Broj prvih mjesta za godišnji AE svakog od modela za sve tri lokacije

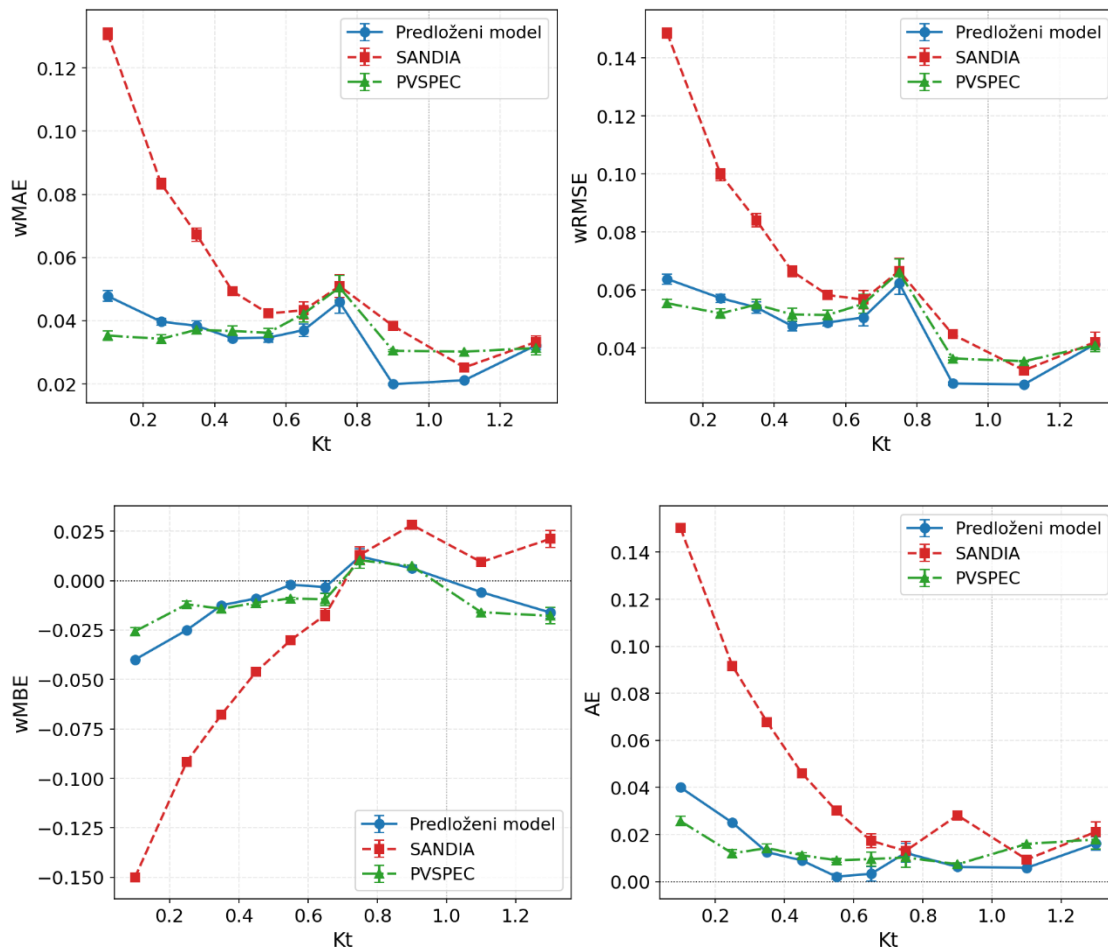
Metrika	Lokacija	Predloženi model	SANDIA	PVSPEC
wMBE	Almeria	9/9	0/9	0/9
	Golden	9/9	0/9	0/9
	Lindenberg	0/9	0/9	9/9

Tablica 4.30 Tablice SD vrijednosti za AE za sve tri lokacije i dvije lokacije za sva tri modela

	SD(A,G,L) PM	SD(A,G,L) SANDIA	SD(A,G,L) PVSPEC	SD(A,G) PM	SD(A,G) SANDIA	SD(A,G) PVSPEC
a-Si	0,0043	0,0139	0,0112	0,0013	0,0166	0,0107
Perovskit	0,0047	0,0108	0,0018	0,0006	0,0085	0,0008
CdTe	0,0045	0,0119	0,0049	0,0008	0,0112	0,0041
CZTSSe	0,0043	0,0139	0,0112	0,0013	0,0166	0,0107
CIGS	0,0047	0,0108	0,0018	0,0006	0,0085	0,0008
Mono-Si HJT	0,0045	0,0119	0,0049	0,0008	0,0112	0,0041
Mono-Si PERC	0,0043	0,0139	0,0112	0,0013	0,0166	0,0107
Mono-Si PERT	0,0047	0,0108	0,0018	0,0006	0,0085	0,0008
Poli-Si	0,0045	0,0119	0,0049	0,0008	0,0112	0,0041

Analiza po pojedinim lokacijama pokazuje da je Lindenberg lokacija na kojoj svi promatrani modeli ostvaruju najveća odstupanja, što je u skladu s njezinim specifičnim atmosferskim uvjetima i ograničenom veličinom validacijskog skupa. Unatoč tome, predloženi model na Lindenbergu postiže rezultate usporedive s PVSPEC-om, a za tankoslojne tehnologije čak i nešto bolje u pogledu metrika wMAE i wRMSE, što potvrđuje njegovu robusnost i izvan referentnih uvjeta. Nešto bolja izvedba PVSPEC-a, naročito za kristalne tehnologije na ovoj

lokaciji fizikalno je očekivana, budući da se PVSPEC oslanja isključivo na varijable AM i K_t , a njihova kombinacija u oblačnim uvjetima postaje dominantan prediktor spektralnog faktora, dok dodatne varijable poput temperature zraka i relativne vlažnosti, uključene u predloženi model, u takvim uvjetima imaju ograničen doprinos. Slika 4.31 prikazuje ovisnost evaluacijskih metrika o indeksu vedrine neba K_t , koji izravno odražava razinu naoblake i prozračnost atmosfere. Iz grafova je vidljivo da prednost pojedinog modela nije uniformna kroz čitav raspon K_t vrijednosti. Za vrijednosti K_t ispod 0,3, koje po tablici 2.5 odgovaraju uvjetima jake naoblake, PVSPEC model dosljedno ostvaruje niže vrijednosti metrika pogreške od predloženog modela. U rasponu K_t od 0,3 do 0,6, koji odgovara umjereno oblačnim uvjetima, predloženi model preuzima prednost i ostvaruje niže pogreške, iako razlike tu još uvijek nisu previše izražene. Za vrijednosti K_t iznad 0,6, koje odgovaraju pretežno vedrim do vedrim uvjetima, predloženi model zadržava nižu razinu pogreške.



Slika 4.31 Odnos $wMAE$ (gore lijevo), $wRMSE$ (gore desno), $wMBE$ (dolje lijevo) i AE (dolje desno) sa K_t

Ovi rezultati u potpunosti razjašnjavaju opisanu situaciju na lokaciji Lindenberg. Budući da prosječna godišnja vrijednost K_t za Lindenberg iznosi 0,65, za Golden 0,84, a za Almeriju 0,92, jasno je da Lindenberg provodi znatno veći udio vremena upravo u onom rasponu K_t vrijednosti (ispod 0,6) gdje PVSPEC pokazuje bolju izvedbu. Nasuprot tome, Golden i Almeria imaju dosta veći udio podataka za K_t vrijednosti iznad 0,6 gdje predloženi model ostvaruje nižu pogrešku.

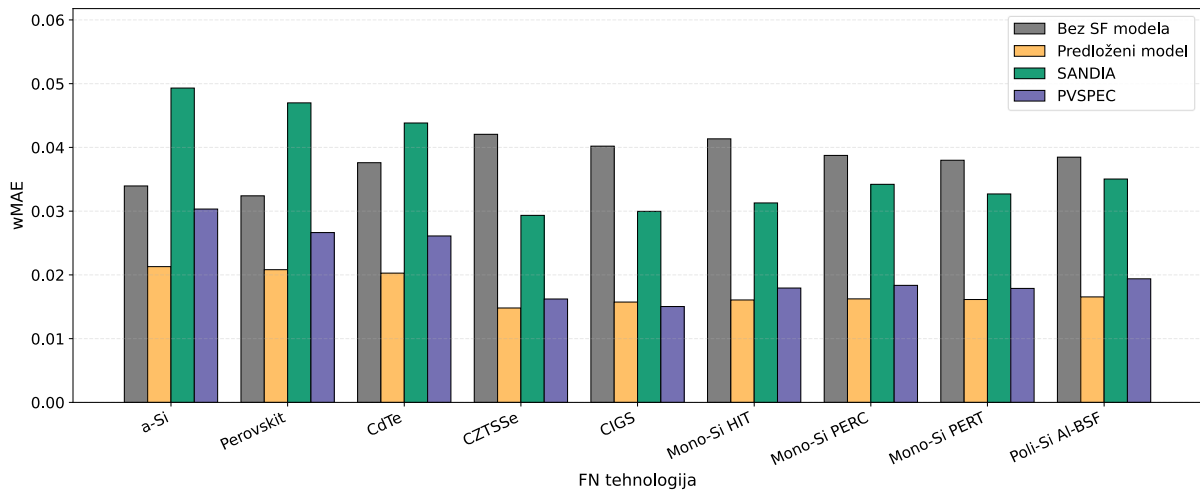
S druge strane, Sandia model na Almeriji pokazuje znatno bolju izvedbu nego na preostale dvije lokacije, što je u skladu s činjenicom. Na Almeriji Sandia čak ostvaruje niže wMBE vrijednosti od PVSPEC-a za svih devet FN tehnologija, što upućuje na to da u uvjetima dominantno vedrih dana vrlo dobro reproducira pristranost spektralnog faktora i može biti praktičan alat kada je primarni cilj minimizacija godišnje energetske pogreške, a spektralna mjerenja nisu dostupna. U cjelini, rezultati pokazuju da predloženi model ostvaruje najstabilnije performanse na dvije od tri analizirane lokacije na različitim FN tehnologijama, uz konkurentne ili bolje metrike u odnosu na referentne modele, čime se potvrđuje njegova sposobnost generalizacije preko lokacija i opravdava njegova primjena u realnim uvjetima.

4.6.2. Validacija na neovisnom skupu podataka

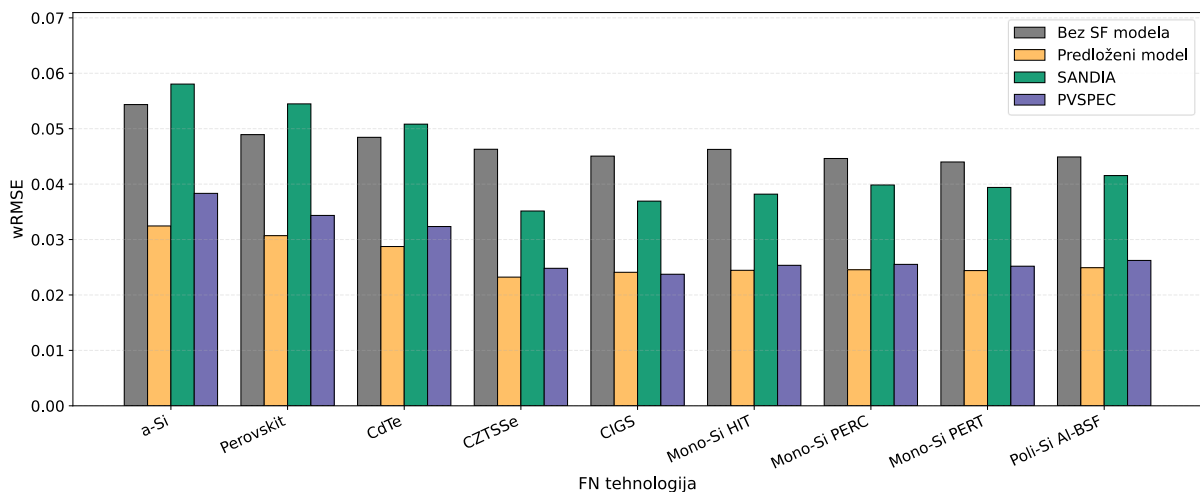
Za validaciju na neovisnom skupu podataka odabrana je mjerna lokacija Golden (Colorado, SAD), pri čemu su podaci za cijelu 2022. godinu u potpunosti izdvojeni i rezervirani isključivo za neovisnu validaciju. Na taj način osigurano je da validacijski skup podataka ne dijeli niti jedan vremenski korak s treniranjem. Na slikama 4.32 i 4.33 prikazane su vrijednosti wMAE i wRMSE predloženog modela za svih devet FN tehnologija na neovisnom skupu podataka. Predloženi model ostvaruje manju wMAE od PVSPEC-a za sve tehnologije osim CIGS-a: za a-Si wMAE iznosi 0,0213 naspram PVSPEC-ove 0,0303 (smanjenje od 30%), za CdTe 0,0203 naspram 0,0261 (-22%), za perovskit 0,0208 naspram 0,0266 (-22%). Za kristalne silicijske tehnologije predloženi model ostvaruje smanjenja wMAE u odnosu na PVSPEC između 10 i 15% (CZTSSe: -9%, mono-Si PERC: -12%, poli-Si: -15%, LG N-type: -10%, HJT: -10%). Iznimka je CIGS, gdje PVSPEC (0,0150) ostvaruje minimalnu prednost nad predloženim modelom (0,0157, razlika +5%), što upućuje na to da je PVSPEC za tu tehnologiju nešto bolje prilagođen klimatskim uvjetima lokacije Golden. U svim slučajevima Sandia model pokazuje znatno veće wMAE vrijednosti od oba pristupa - prosječno smanjenje predloženog modela u odnosu na Sandiu iznosi 52% (a-Si: -57%, CdTe: -54%, perovskit: -56%, kristalne Si: -49-53%).

Za wRMSE, koji jače penalizira povremene veće pogreške, zaključci su konzistentni s wMAE analizom. Predloženi model postiže manje wRMSE od PVSPEC-a za sve tehnologije osim

CIGS-a (a-Si: 0,0324 vs. 0,0383, smanjenje -15%; CdTe: 0,0287 vs. 0,0323, -11%; perovskit: 0,0307 vs. 0,0343, -11%), dok su za kristalne tehnologije razlike između predloženog modela i PVSPEC-a manje (-4 do -6%), s minimalnom prednošću PVSPEC-a za CIGS (+2%). Sandia model u svim slučajevima ostvaruje najveće wRMSE vrijednosti, a prosječno smanjenje predloženog modela u odnosu na Sandiu iznosi 39% (a-Si: -44%, CdTe: -43%, perovskit: -44%, kristalne Si: -34-40%), čime se i na neovisnom skupu podataka potvrđuje da Sandia model najlošije opisuje energetske relevantne uvjete rada FN sustava.



Slika 4.32 wMAE predloženog modela i modela iz literature.



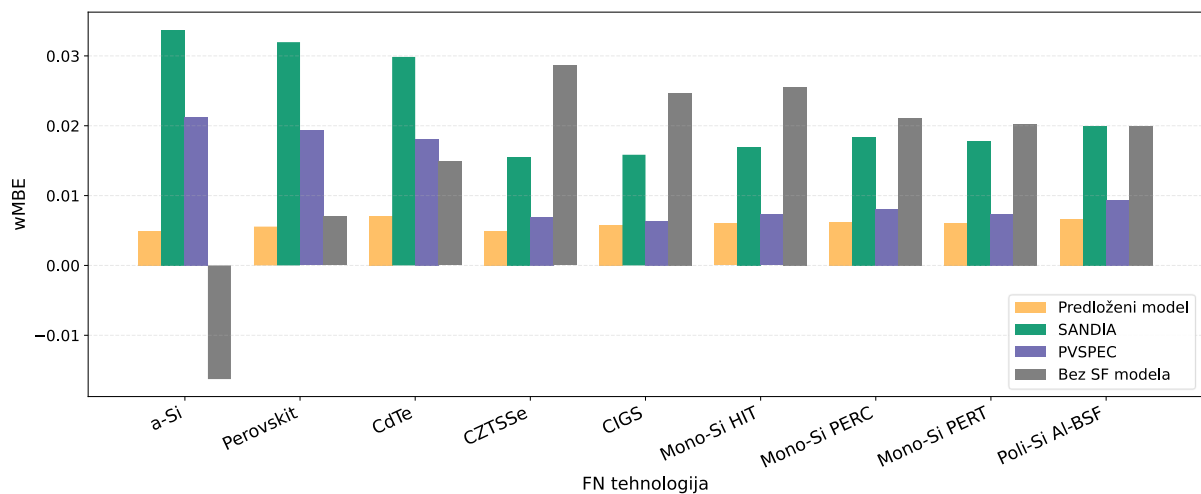
Slika 4.33 wRMSE predloženog modela i modela iz literature.

Srednja sustavna pogreška (wMBE) prikazana na slici 4.34 daje dodatni uvid u sustavne tendencije modela na neovisnom skupu podataka. Predloženi model postiže konzistentno male pozitivne wMBE vrijednosti za sve tehnologije (a-Si +0,0049, CdTe +0,0070, perovskit +0,0056, CIGS +0,0058, CZTSSe +0,0049, kristalne Si tehnologije 0,0060-0,0066), što znači

da model u energetskim vršnim trenucima blago precjenjuje spektralni faktor, ali pri tome razina pristranosti ostaje znatno niža od one referentnih modela.

Sandia SAPM model na neovisnom skupu pokazuje izrazito veliku pozitivnu wMBE za sve tehnologije, osobito za a-Si (+0,0338), perovskit (+0,0320) i CdTe (+0,0299) - što znači da Sandia u uvjetima visokog ozračenja sustavno i znatno precjenjuje spektralni faktor, čime unosi energetski relevantnu pristranost u procjenu prinosa. PVSPEC model pak pokazuje pozitivnu wMBE na svim tehnologijama, ali nešto manje izraženu nego Sandia, primjerice za a-Si +0,0213, za CdTe +0,0182, za perovskit +0,0193, dok su za kristalne Si tehnologije wMBE vrijednosti PVSPEC-a reda 0,0074-0,0093.

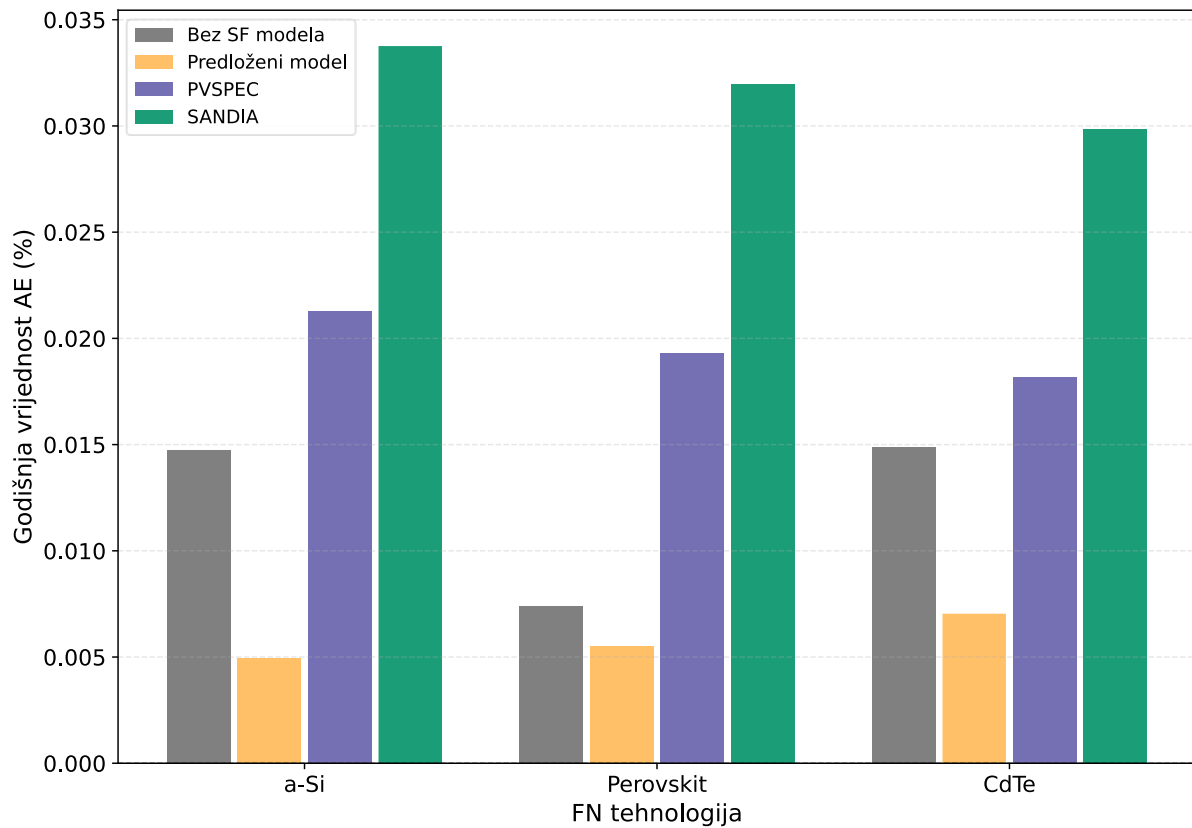
Predloženi model ima niži wMBE u odnosu na Sandia model između 64 i 86% ovisno o tehnologiji. Najveće su razlike za tankoslojne tehnologije (a-Si -86%, perovskit -83%, CdTe -77%) i nešto manjima za kristalne silicijske tehnologije (64-68%). U usporedbi s PVSPEC modelom vrijednosti su niže rasponu 18-77%, pri čemu su opet najveće razlike za a-Si (-77%), perovskit (-71%) i CdTe (-62%), dok su za kristalne Si tehnologije razlike u rasponu 18-34%.



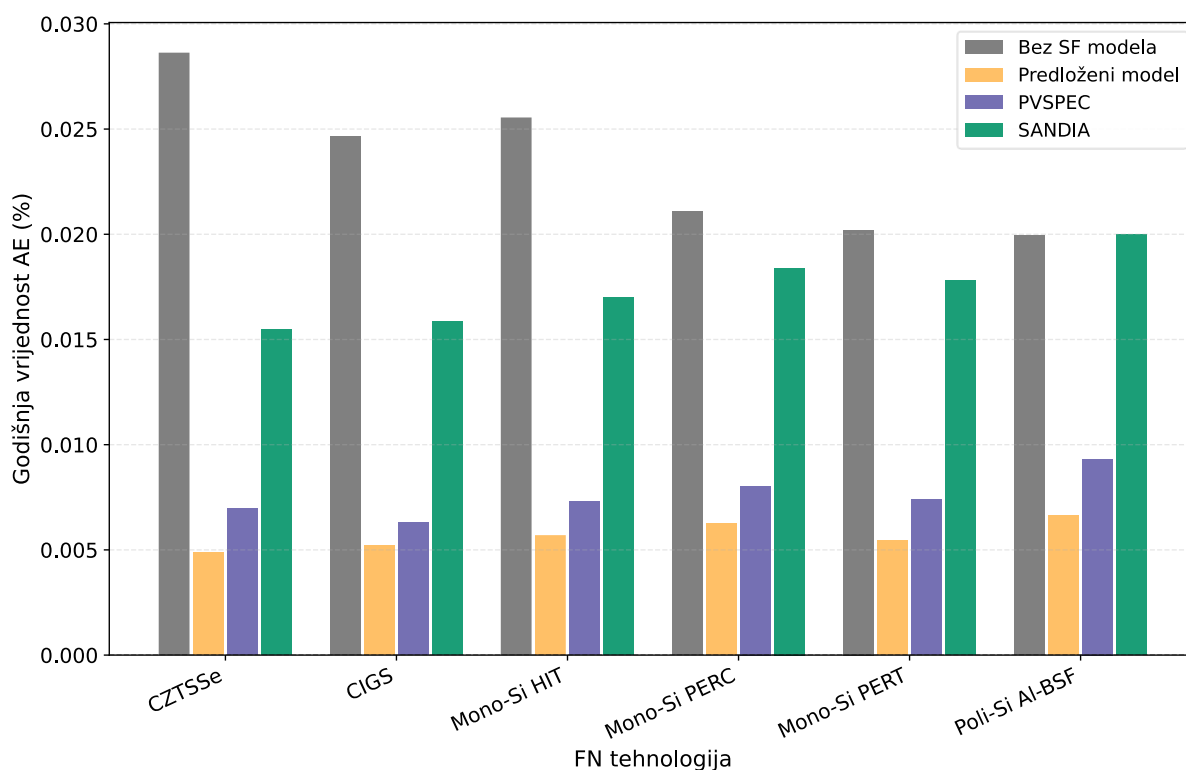
Slika 4.34 wMBE predloženog modela i modela iz literature.

Za spektralno najosjetljivije tankoslojne tehnologije predloženi model ostvaruje iznimno nisku godišnju energetsku pogrešku što je prikazano na slikama 4.35 i 4.36. Posebno su izražene niže vrijednosti u odnosu na Sandia model posebno izražena: a-Si -85%, CdTe -76%, perovskit -83%, dok su smanjenja u usporedbi s PVSPEC modelom nešto umjerenija, ali i dalje znatna (a-Si -77%, CdTe -61%, perovskit -72%). Ovaj rezultat ujedno otkriva važno ograničenje postojećih modela iz literature: i Sandia i PVSPEC model pokazuju znatno narušenu točnost upravo za a-Si, CdTe i perovskit, odnosno za tehnologije s uskim spektralnim odzivom koje su najvisnije o spektralnoj korekciji. Za preostale tehnologije predloženi model postiže smanjenja

godišnjeg AE između 66 i 70% u odnosu na Sandia model (CIGS -67%, CZTSSe -69%, mono-Si PERC -66%, poli-Si -67%, mono-Si PERT -70%, mono-Si HJT -66%), a u usporedbi s PVSPEC modelom smanjenja su u rasponu 18-30% (CIGS -18%, CZTSSe -30%, mono-Si PERC -22%, poli-Si -29%, mono-Si PERT -27%, mono-Si HJT -22%), čime predloženi model konzistentno nadmašuje oba referentna modela na svim ispitanim tehnologijama.



Slika 4.35 Godišnja vrijednost AE za a-Si, perovskit i CdTe.



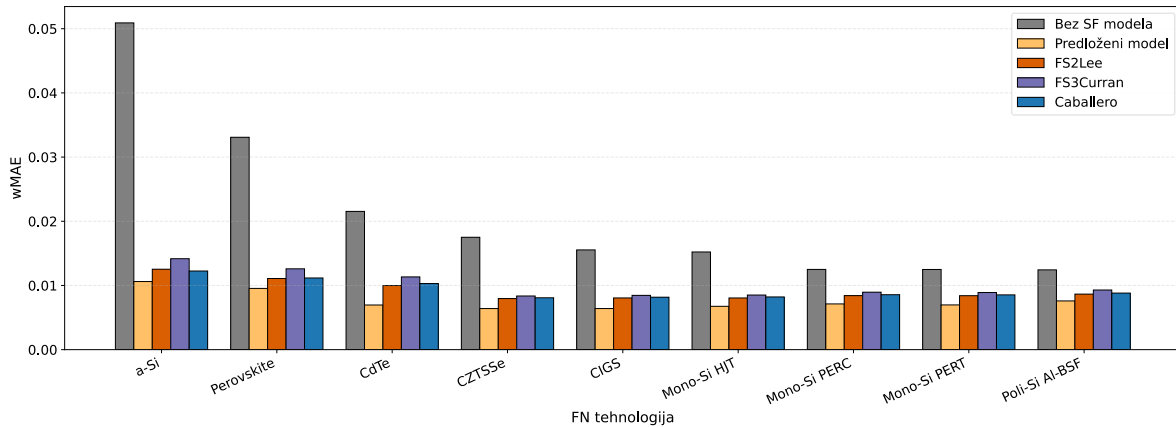
Slika 4.36 Godišnja vrijednost AE za tehnologije od kristalnog silicija, CZTSSe i CIGS.

4.6.3. Validacija na pojedinačnoj lokaciji Almeria za modele za vedro nebo

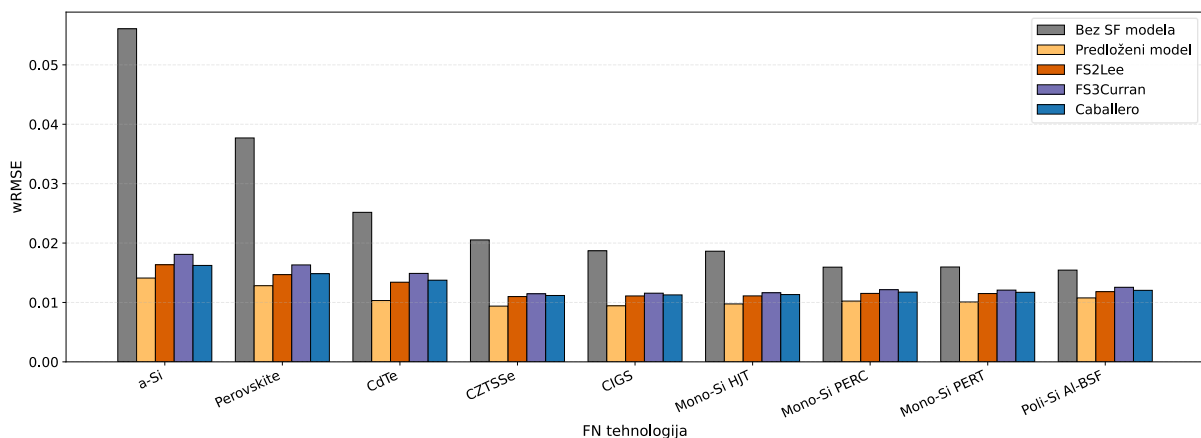
U ovom poglavlju validacija modela vedrog neba na razini pojedinačne lokacije provedena je na lokaciju Almeria. U odnosu na Caballerov model, predloženi model pokazuje sustavno niži wMAE za sve analizirane tehnologije. Za a-Si wMAE je niži za približno 7% (0,0113 prema 0,0106), dok je za perovskit niži za oko 24% (0,0125 prema 0,0095). Za CdTe wMAE je niži za oko 28% (0,0090 prema 0,0070), za CIGS i CZTSSe za približno 19-22% (0,0079-0,0080 prema 0,0064-0,0065), a za kristalne silicijske tehnologije se smanjenje kreće redom oko 17% (mono-Si PERC: 0,0086 prema 0,0071), 18% (poli-Si Al-BSF: 0,0083 prema 0,0068) i 19% (mono-Si PERT: 0,0083 prema 0,0068). Za HJT tehnologiju wMAE je niži približno 18% (0,0083 prema 0,0068).

Za wRMSE se dobiva u potpunosti ista slika. Za a-Si wRMSE je niži za oko 16% (0,0154 prema 0,0129), dok je za perovskit niži za približno 19% (0,0158 prema 0,0128). Za CdTe wRMSE je niži za oko 22% (0,0132 prema 0,0103), a za CIGS i CZTSSe za približno 17-19% (0,0113-0,0115 prema 0,0094-0,0096). Kod kristalnog silicija wRMSE je niži za red veličine 18-21% (mono-Si PERC: 0,0117 prema 0,0102; mono-Si PERT: 0,0113 prema 0,0098; poli-Si Al-BSF: 0,0113 prema 0,0098), dok je za HJT niži približno 18% (0,0115 prema 0,0098). Takvi rezultati

potvrđuju da predloženi model za vedro nebo zadržava jasnu i kvantitativno stabilnu prednost nad Caballerovim modelom, kako u smislu wMAE tako i u smislu wRMSE, za sve promatrane FN tehnologije.



Slika 4.37 wMAE za predloženi model vedrog neba i modele iz literature.



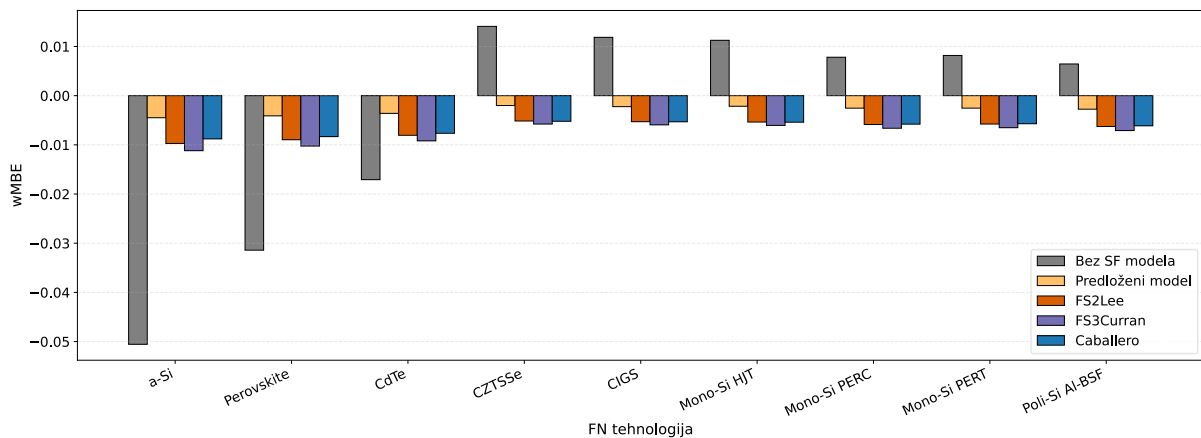
Slika 4.38 wRMSE za predloženi model vedrog neba i modele iz literature.

Srednja ozračnjem ponderirana pristranost (wMBE) na neovisnom skupu za uvjete vedrog neba za Almeríu dodatno naglašava razlike između predloženog modela za vedro nebo i referentnih pristupa iz literature. Predloženi model ostvaruje niske negativne wMBE vrijednosti za većinu tehnologija, reda veličine $-0,002$ do $-0,0035$ (npr. a-Si $-0,0045$, CdTe $-0,0036$, kristalne Si tehnologije oko $-0,0020$ do $-0,0027$), pri čemu su za CIGS i CZTSSe wMBE također male, oko $-0,0020$ do $-0,0024$. Takve vrijednosti ukazuju da model u energetske vršnim trenucima blago podcjenjuje spektralni faktor, a razina pristranosti ostaje bitno manja od one kod svih promatranih modela iz literature.

Caballerov model na istom skupu podataka pokazuje znatno veće apsolutne wMBE vrijednosti, osobito za spektralno osjetljive tankoslojne tehnologije. Za a-Si wMBE je prema Caballeru

približno $-0,0059$, dok je kod predloženog modela oko $-0,0045$, što odgovara smanjenju pristranosti reda 20–25%. Za CdTe wMBE se smanjuje s oko $-0,0036$ na oko $-0,0028$, dok su za CIGS i CZTSSe relativna smanjenja apsolutne pristranosti tipično reda 25–35%, ovisno o tehnologiji. U slučaju kristalnih silicijskih tehnologija (mono-Si PERC, mono-Si PERT i poli-Si Al-BSF) predloženi model reducira apsolutnu wMBE s približno $0,0028-0,0030$ na razinu oko $0,0020-0,0027$, što također predstavlja smanjenje pristranosti reda 20–30%.

FS2 i FS3 ostvaruju još veće apsolutne wMBE vrijednosti od Caballero modela, osobito za tankoslojne tehnologije i perovskit, pa predloženi model u odnosu na njih smanjuje ozračanjem ponderiranu pristranost tipično za 40-60%, s najizraženijim redukcijama upravo za a-Si, CdTe, CIGS, CZTSSe i perovskit. Time se pokazuje da model za vedro nebo, uz već pokazano smanjenje wMAE i wRMSE, značajno reducira i energetski relevantnu pristranost u clear-sky uvjetima na lokaciji Almeria, što je ključno za pouzdanu procjenu godišnjeg prinosa FN sustava

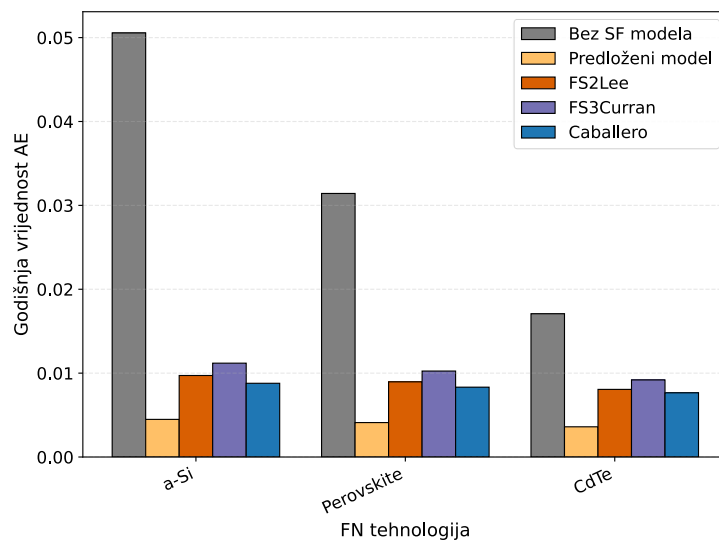


Slika 4.39 wMBE za predloženi model vedrog neba i modele iz literature.

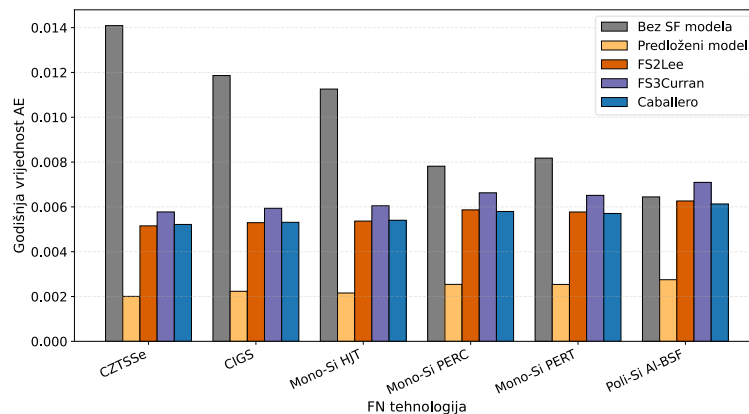
Za godišnji AE predloženi model vedrog neba za Almeriju također pokazuje niže vrijednosti od Caballero pristupa za sve promatrane tehnologije. U odnosu na Caballero model, godišnji AE je niži za oko 34% za a-Si (0,00449 prema 0,00295), približno 48% za CdTe (0,00633 prema 0,00328) te oko 19–23% za perovskit (0,00404 prema 0,00329), dok su smanjenja za CIGS i CZTSSe reda 30–33% (CIGS: 0,00355 prema 0,00237; CZTSSe: 0,00377 prema 0,00253). Za kristalne silicijske tehnologije godišnji AE je niži za približno 25–27% za mono-Si PERC (0,00378 prema 0,00284), za oko 14–15% za poli-Si Al-BSF (0,00406 prema 0,00346) te za približno 26–28% za mono-Si PERT i HJT (0,00360 prema 0,00266 i 0,00362 prema 0,00263). Pri tome FS2 i FS3 u gotovo svim slučajevima ostvaruju veće godišnje AE vrijednosti

od Caballerova modela, osobito za tankoslojne tehnologije, pa je relativno smanjenje godišnjeg AE predloženim modelom u odnosu na FS2/FS3 još izraženije.

U cjelini, analiza godišnjeg AE na neovisnom clear-sky skupu za Almerú potvrđuje iste zaključke kao i wMAE i wRMSE: predloženi model za vedro nebo sustavno smanjuje godišnju apsolutnu pogrešku za sve promatrane tehnologije u odnosu na sve pristupe iz literature, pri čemu su dobiti najveći upravo za spektralno osjetljive tankoslojne tehnologije (a-Si, CdTe, CIGS, CZTSSe i perovskit).



Slika 4.40 Godišnja vrijednost AE za a-Si, perovskit i CdTe za modele vedrog neba.

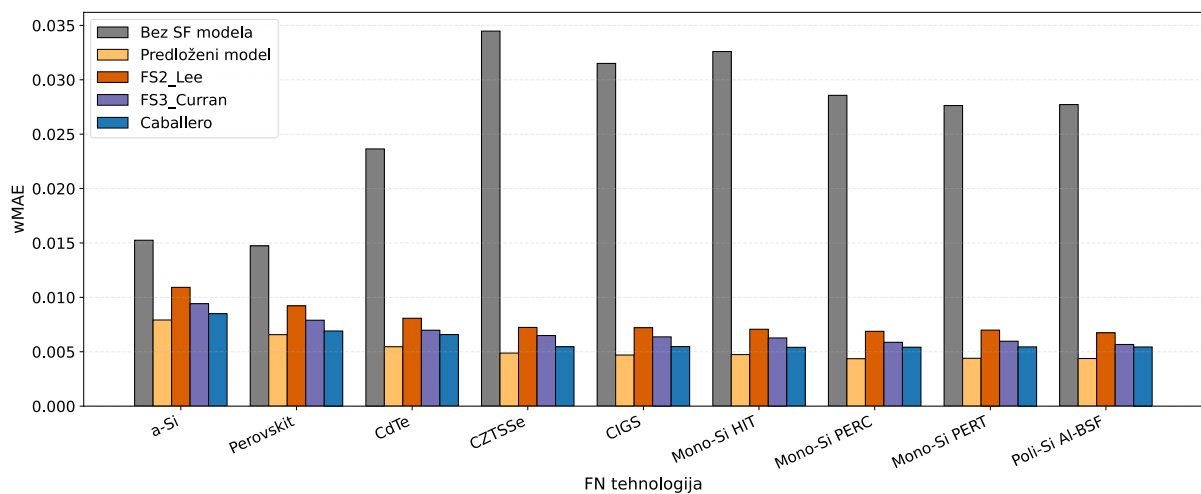


Slika 4.41 Godišnja vrijednost AE za tehnologije od kristalnog silicija, CZTSSe i CIGS za modele vedrog neba za validaciju na lokaciji Almeria.

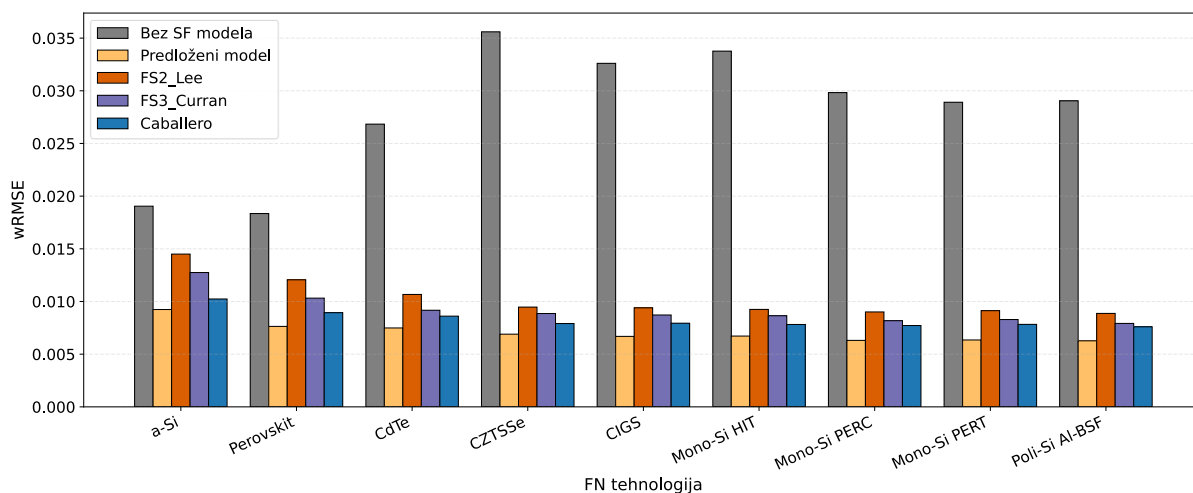
4.6.4. Validacija na neovisnom skupu podataka

Kao i za model za sve uvjete neba, provedena je neovisna validacija modela za uvjete vedrog neba na zasebnom skupu podataka za lokaciju Golden za 2022. godinu, a na odgovarajućim slikama prikazani su i ti rezultati za svih devet FN tehnologija. U odnosu na Caballero model, predloženi model pokazuje sustavno niži wMAE: za a-Si wMAE je niži za približno 7% (0,0085 prema 0,0079), za CdTe je niži za $\approx 17\%$ (0,0066 prema 0,0055), za CIGS i CZTSSe je niži za $\approx 11-14\%$ (oko 0,0055 prema 0,0047-0,0049), za mono-Si PERC i poli-Si je niži za $\approx 19\%$ (0,0054 prema 0,0044), za LG N-type je niži za $\approx 20\%$ (0,0055 prema 0,0044) te za HJT je niži za $\approx 13\%$ (0,0054 prema 0,0047).

Za wRMSE se dobiva potpuno konzistentna slika: za a-Si wRMSE je niži za $\approx 10\%$ (oko 0,0102 prema 0,0092), za CdTe je niži za $\approx 13\%$ (0,0086 prema 0,0075), za CIGS i CZTSSe je niži za $\approx 13-15\%$ (0,0079 prema oko 0,0067-0,0069), dok je za kristalne silicijske tehnologije wRMSE niži za reda 15-20% (približno 0,0077-0,0080 prema 0,0063-0,0067). Takvi rezultati na neovisnom clear-sky skupu potvrđuju da predloženi model za vedro nebo zadržava jasnu prednost nad Caballero modelom.



Slika 4.42 wMAE za predloženi model vedrog neba i modele iz literature.

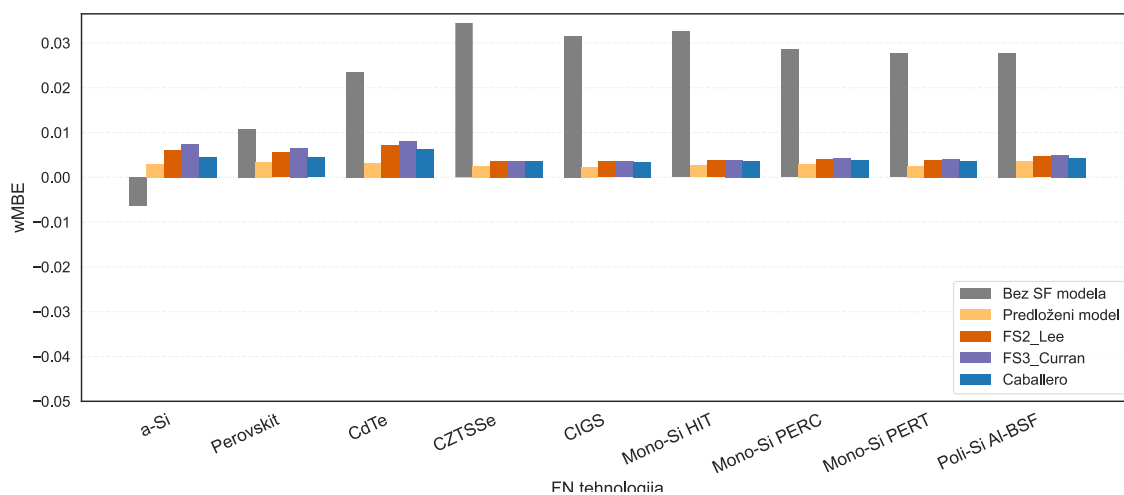


Slika 4.43 wRMSE za predloženi model i modele iz literature.

Srednja ozračenjem ponderirana pristranost (wMBE) na neovisnom clear-sky skupu za Golden dodatno potvrđuje razlike između predloženog modela za vedro nebo i referentnih pristupa iz literature. Predloženi model ostvaruje male pozitivne wMBE vrijednosti za sve tehnologije, reda veličine 0,002-0,0035 (a-Si 0,0030, CdTe 0,00026, perovskit 0,0034, kristalne Si tehnologije 0,0025-0,0037), pri čemu su za CIGS i CZTSSe wMBE vrijednosti također niske, oko 0,0023-0,0025. Takve vrijednosti znače da model u energetskim vršnim trenucima tek blago precjenjuje spektralni faktor, a razina pristranosti ostaje bitno manja od one kod svih promatranih modela iz literature.

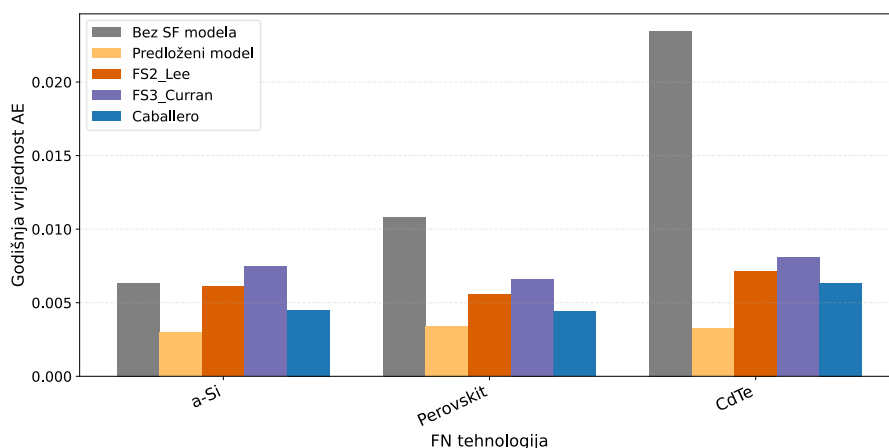
Caballerov model na istom skupu podataka pokazuje značajno veće wMBE vrijednosti od predloženog modela, a relativna smanjenja pristranosti kreću se od približno jedne trećine do gotovo potpunog uklanjanja pogreške. Za a-Si wMBE je smanjena za oko 35% u odnosu na Caballerov pristup, dok se za CdTe pristranost reducira za više od 95%, što znači da je gotovo u potpunosti uklonjena. Za CIGS i CZTSSe smanjenja wMBE su reda 40-45%, a usporediva relativna poboljšanja (otprilike 40-45%) postižu se i za kristalne silicijske tehnologije te za perovskit.

FS2 i FS3 u pravilu ostvaruju još veće pozitivne wMBE vrijednosti od Caballerova modela, pa predloženi model u odnosu na njih smanjuje ozračenjem ponderiranu pristranost tipično za 50-80%, s najizraženijim redukcijama upravo za spektralno osjetljive tankoslojne tehnologije poput a-Si, CdTe i perovskita. Time se pokazuje da model za vedro nebo, uz smanjenje wMAE i wRMSE, značajno reducira i energetski relevantnu pristranost u clear-sky uvjetima, što je ključno za pouzdanu procjenu godišnjeg prinosa FN sustava.

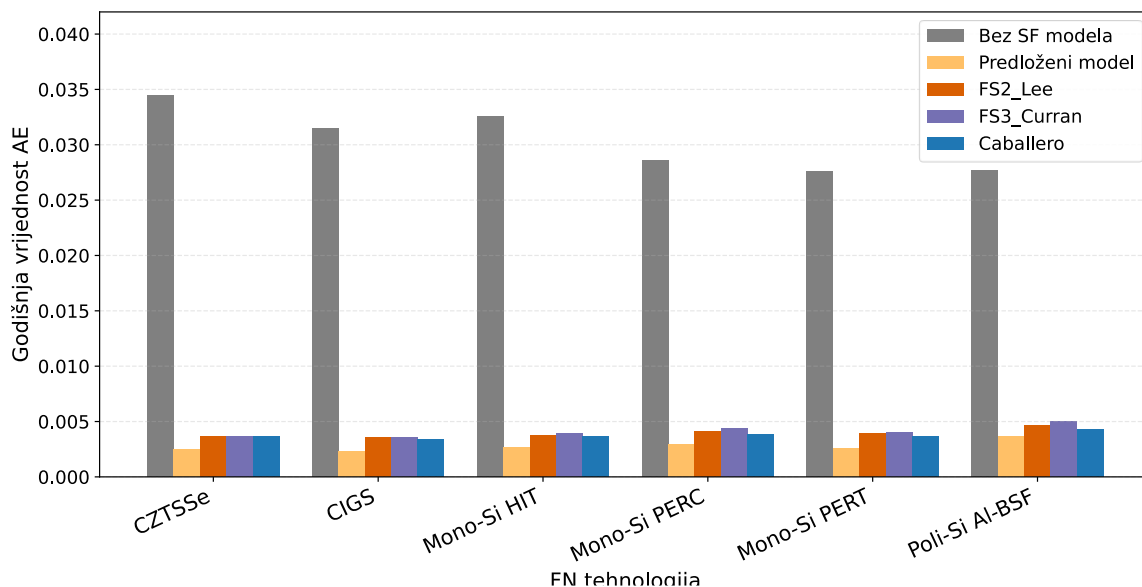


Slika 4.44 wMBE za predloženi model vedrog neba i modele iz literature.

Za godišnji AE predloženi model vedrog neba također pokazuje niže rezultate. U odnosu na Caballerov model, godišnji AE je niži za oko 34,2% za a-Si (0,00452 prema 0,00297), približno 48,5% za CdTe (0,00633 prema 0,00326) te oko 22,9% za perovskit (0,00444 prema 0,00343), dok su smanjenja za CIGS i CZTSSe reda 30-32% (CIGS: 0,00343 prema 0,00234; CZTSSe: 0,00362 prema 0,00251). Za kristalne tehnologije godišnji AE je niži za približno 26,8% za mono-Si PERC (0,00385 prema 0,00296), oko 14,0% za poli-Si (0,00427 prema 0,00367) te oko 26,8-27,1% za mono-Si PERT i HJT (0,00362 prema 0,00255 i 0,00365 prema 0,00267), pri čemu FS2 i FS3 pokazuju još veće godišnje AE vrijednosti od Caballerova modela u gotovo svim slučajevima. U cjelini, godišnji AE u analizi za vedro nebo potvrđuje iste zaključke kao i wMAE i wRMSE.



Slika 4.45 Godišnja vrijednost AE za a-Si, perovskit i CdTe za modele vedrog neba za nezavisnu validaciju.



Slika 4.46 Godišnja vrijednost AE za tehnologije od kristalnog silicija, CZTSSe i CIGS za modele vedrog neba za validaciju na neovisnom skupu podataka.

4.7. Osvrt na razvijene modele

Najvažniji doprinos ovog poglavlja jest razvoj modela spektralne korekcije za sve uvjete neba, koji predstavlja glavni rezultat disertacije i ključnu osnovu za buduću primjenu. Model je konstruiran u dva koraka: metoda slučajne šume služi za identifikaciju i rangiranje atmosferskih varijabli i njihovih matematičkih kombinacija, a konačna funkcijska ovisnost $SF-a$ dobiva se analitičkim modelom čiji su koeficijenti određeni metodom najmanjih kvadrata, uz inverzno frekvencijsko ponderiranje kako bi svaka od tri klimatski različite lokacije (Golden, Almeria, Lindenberg) imala uravnotežen utjecaj. Time nastaje jedinstveni, fizikalno interpretabilan model za sve uvjete neba i sve promatrane FN tehnologije, koji se oslanja isključivo na globalno dostupne atmosferske varijable i stoga je odmah primjenjiv na velikom broju lokacija.

Peterostruka unakrsna validacija za model svih uvjeta neba pokazuje da su metrike pogreške izuzetno stabilne, s vrlo malim razlikama između pojedinih foldova za sve tehnologije. MAE i RMSE se mijenjaju tek u trećoj decimali, relativne standardne devijacije su reda 0,5-0,8%, a standardne pogreške procjene srednje vrijednosti oko 0,2-0,3%, što pokazuje da ni regresijski koeficijenti ni evaluacijske metrike ne ovise osjetno o konkretnoj podjeli podataka. Ponderirane metrike (wMAE, wRMSE) dodatno učvršćuju taj zaključak jer naglašavaju visoka ozračenja, najrelevantnija za energetske prinos, ali pritom ostaju jednako stabilna kroz svih pet foldova. MBE i wMBE su male i blago negativne za gotovo sve tehnologije, što upućuje na minimalno,

konzistentno podcjenjivanje bez prelaska u značajnu pozitivnu pristranost u bilo kojem dijelu raspona uvjeta.

Analiza po lokacijama za model svih uvjeta neba potvrđuje da taj model dobro hvata razlike između suših, sunčanih klima (Golden), mediteranske obalne klime (Almeria) i oblačnije, umjereno-vlažne klime (Lindenberg). Za Golden i Almeriju model za sve uvjete neba gotovo u pravilu postiže najniže wMAE i wRMSE u odnosu na referentne modele iz literature za sve tehnologije, s osobito velikim poboljšanjima za a-Si, CdTe, CIGS, CZTSSe i perovskit, gdje postojeći modeli pokazuju najveća odstupanja. U Lindenbergu, gdje su prosječne vrijednosti K_t niže i veći je udio difuznog zračenja, pojedini referentni pristupi mogu lokalno nadmašiti predloženi model za kristalne tehnologije, ali predloženi model i tamo zadržava kompetitivne pogreške i ostaje najbolji ili jedan od najboljih za tankoslojne tehnologije, što potvrđuje da se radi o robusnom rješenju čak i u klimatski zahtjevnijim uvjetima.

Ključna metodološka prednost modela za sve uvjete neba jest činjenica da je treniran na tri klimatski izrazito različite lokacije, uz eksplicitno rješavanje neuravnoteženosti podataka, pa dobiveni koeficijenti odražavaju opće zakonitosti između atmosferskih varijabli i $SF-a$, a ne specifičnosti jedne lokacije ili godine. Time se model jasno razlikuje od većine postojećih modela u literaturi, koji su tipično razvijeni za jednu lokaciju i za ograničen broj tehnologija, često bez formalne kontrole neuravnoteženih skupova i bez sustavne višelokacijske validacije. U disertaciji se dodatno planira i naglašava daljnja validacija modela za sve uvjete neba na novim lokacijama, posebno u Splitu gdje je već uspostavljena platforma za kontinuirano mjerenje spektra, što otvara put prema generalizaciji na još širi skup klimatskih uvjeta.

S obzirom na to da je model za sve uvjete neba analitičkog oblika, s jasno definiranom listom ulaznih varijabli i statistički dobro određenim koeficijentima, on se može relativno jednostavno integrirati u postojeće programske alate i modele procjene proizvodnje FN sustava. U praksi to znači da se nad standardne $G-T$ modele ili postojeće energetske simulacijske pakete može nadograditi spektralna korekcija, bez potrebe za složenim spektralnim mjerenjima na svakoj lokaciji. Na taj način model za sve uvjete neba predstavlja znanstveni doprinos u smislu metodologije i višelokacijske validacije, ali i praktičan alat za smanjenje nesigurnosti u procjeni godišnjeg prinosa FN sustava u širokom rasponu klimatskih uvjeta i za različite FN tehnologije.eksterna

5. USPOSTAVA PLATFORME ZA KONTINUIRANO MJERENJE SPEKTRA SUNČEVA ZRAČENJA

U sklopu izrade ove doktorske disertacije uspostavljena je platforma za kontinuirano mjerenje spektra Sunčeva zračenja na krovu Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje (FESB) Sveučilišta u Splitu. Detaljni podaci o lokaciji mjernog sustava dani su u tablici 5.1. Prema saznanjima autora, radi se o prvoj platformi za kontinuirano spektrometrijsko mjerenje u Republici Hrvatskoj - nigdje drugdje na njenom teritoriju ne provode se sustavna mjerenja spektralne raspodjele Sunčeva zračenja. Ova činjenica u širem kontekstu ne iznenađuje, s obzirom na to da su, kako je detaljno opisano u drugom poglavlju, kontinuirana mjerenja spektra Sunčeva zračenja iznimno rijetka te su ograničena na mali broj specijaliziranih istraživačkih laboratorija. Složenost i visoka cijena mjerenja spektra te potreba za redovitom kalibracijom sofisticirane mjerne opreme čine ovakva mjerenja izuzetno zahtjevnima. Stoga sama uspostava kontinuirane spektrometrijske platforme i prikupljanje cjelogodišnjeg skupa podataka na novoj lokaciji predstavlja znanstveni doprinos, budući da svaki novi skup visokokvalitetnih spektralnih mjerenja obogaćuje globalnu bazu znanja o spektralnim karakteristikama Sunčeva zračenja u različitim klimatskim uvjetima. Osim samog mjerenja, provedena je detaljna kontrola kvalitete mjerenih podataka te prikupljanje i vremenska interpolacija dostupnih atmosferskih varijabli. Također, napravljen je proračun nezavisnog spektralnog faktora prosječne energije fotona (APE) i zavisnog faktora spektralne korekcije (SF) za devet FN tehnologija za cijelo promatrano razdoblje.

Tablica 5.1 Podaci o lokaciji mjerenja [174].

Lokacija	Split, Hrvatska
Geografska širina	43,51° N
Geografska dužina	16,47° W
Nadmorska visina	54 m
Klimatska zona (Köppen-Geiger)	Csa (mediteranska klima s vrućim ljetima)
Prosječan godišnji G	~450-500 W/m ²
Prosječne godišnje oborine	~700 mm
Tipični atmosferski uvjeti	Umjereni vlažnost zraka, sezonski utjecaj saharske prašine (povremeno visok AOD), velik broj vedrih dana s izraženom sezonskom promjenjivošću (vedro ljeto, oblačna zima)
Istraživački centar	FESB, Sveučilište u Splitu

5.1. Opis spektralnih mjerenja

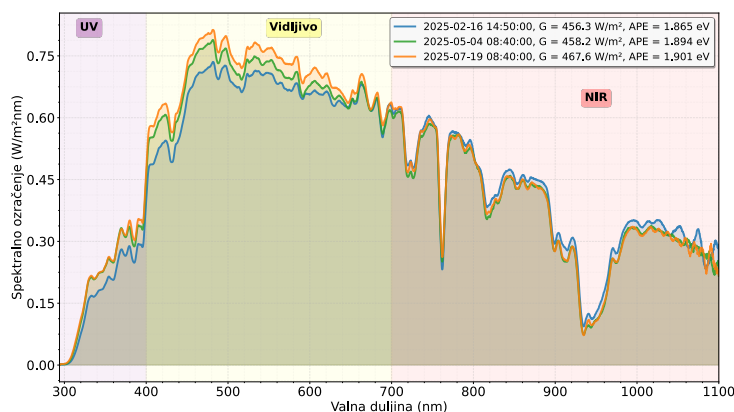
Na slici 5.1 prikazan je spektrometar MS-711 postavljen na vodoravnu plohu na krovu zgrade FESB-a u Splitu. Sustavna mjerenja ukupnog spektralnog ozračenja na vodoravnu plohu započela su u siječnju 2025. godine. Detaljne karakteristike ovog uređaja navedene su u tablici 4.2.



Slika 5.1 MS-711 na krovu FESB-ove zgrade.

Spektroradiometrijska mjerenja u Splitu obuhvaćaju raspon 294-1100 nm (UV-vidljivo-NIR) tijekom cijele godine, s vremenskom rezolucijom 10 minuta od siječnja do travnja i jednom minutom od svibnja do prosinca. Izvan mjerenog raspona, doprinosi u intervalima 280-294 nm i 1100-4000 nm rekonstruirani su metodom spektralne ekstrapolacije koja je detaljno opisana u četvrtom poglavlju. Tako je dobiveno ukupno spektralno ozračenje u rasponu valnih duljina 280-4000 nm na temelju kojih su vršeni daljnji proračuni, kao i usporedba s ukupnim ozračenjem koje je izmjereno piranometrom s termočlankom čija je točnost klase A (prema standardu ISO 9060:2018).

Na slici 5.2 dan je primjer tri mjerenja u različitim periodima godine, sa sličnim iznosom ukupnog ozračenja, ali različitom vrijednošću prosječne energije fotona. Mjerenja na datume 4. svibnja i 19. srpnja imaju bogatiji plavi dio spektra, odnosno veću vrijednost APE u odnosu na referentni spektar AM 1,5 ($APE=1,876$ eV). Jasno je vidljivo da kod njih dominiraju kraće valne duljine (veće energije fotona) u UV i vidljivom području, dok im je udio duljih valnih duljina (NIR područje) manji. U slučaju mjerenja provedenih u veljači može se primijetiti suprotan trend te je spektar Sunčeva zračenja tada blago pomaknut prema crvenom dijelu spektra u odnosu na referentni spektar.

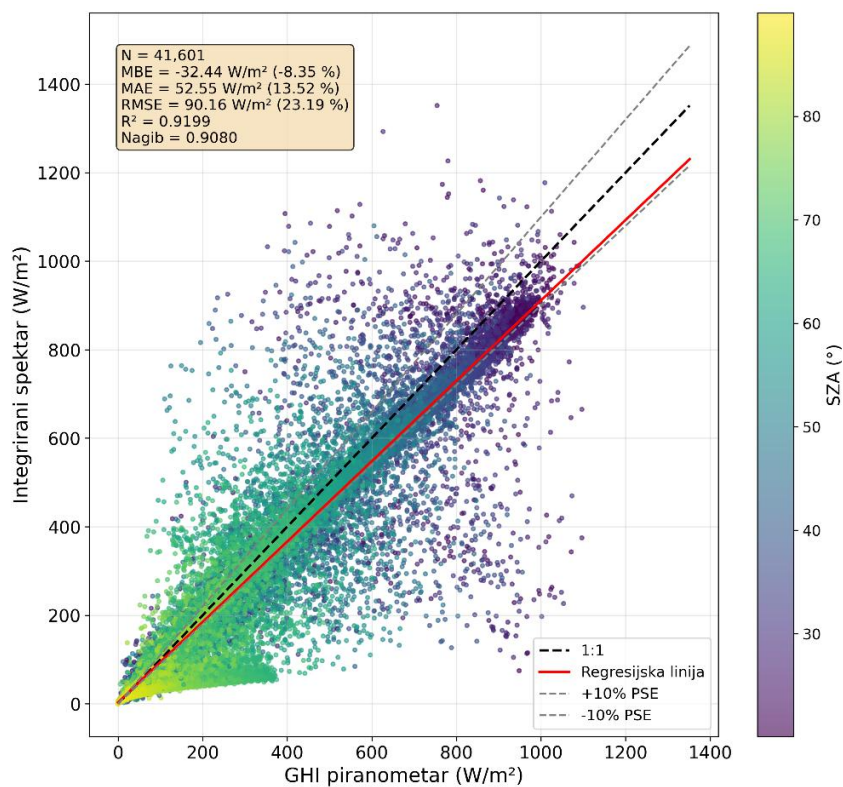


Slika 5.2 Tri mjerena spektra za različite periode godine u Splitu za 2025. godinu (MS-711).

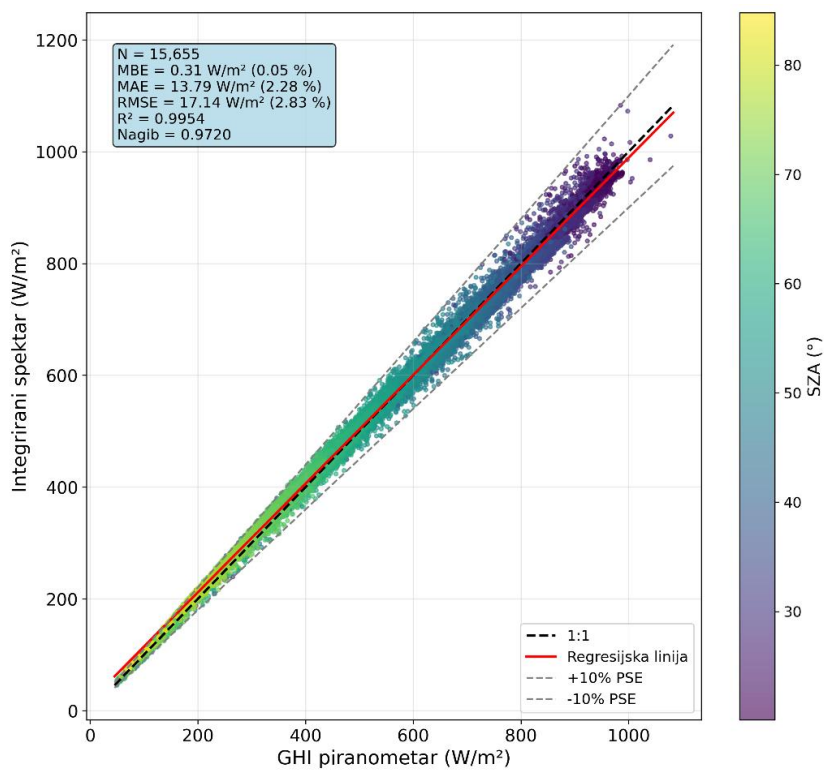
Kod postupka kontrole kvalitete podataka u prvom koraku uklonjena su mjerenja s naglim promjenama indeksa vedrine neba K_t (postavljen je uvjet da apsolutna razlika između susjednih mjerenja ne smije biti veća od 0,1 kao i segmenti od 15 uzastopnih mjerenja za koje je standardna devijacija K_t veća od 0,1). Na taj način uklonjena su mjerenja tijekom kojih su se događale nagle promjene oblačnosti neba. Također, uklonjena su mjerenja za zenitne kutove veće od 90° , kao i mjerenja za koje je ukupno ozračenje manje od 50 W/m^2 . Dodatno je provedena validacija integriranog spektralnog ozračenja s nezavisnim piranometarskim mjerenjima na meteorološkoj postaji Marjan (Državni hidrometeorološki zavod - DHMZ). Integrirano spektralno ozračenje 280-4000 nm uspoređeno je s piranometarskim G vrijednostima uz spomenute procedure kontrole kvalitete, čime je verificirana procedura spektralne ekstrapolacije i konzistentnost spektrometrijskog sustava te je dobiven skup podataka za analizu APE i faktora spektralne korekcije SF za različite FN tehnologije. Detalji o spektralnim mjerenjima sažeti su u tablici 5.2. Usporedba nefiltriranih podataka prikazana je na slici 5.2, a usporedba filtriranih podataka na slici 5.3.

Tablica 5.2 Detalji o provedenim spektralnim mjerenjima

Spektralni raspon	294 - 1100 nm (UV-vidljivo-NIR)
Period mjerenja	Siječanj - prosinac (cijela 2025. godina)
Vremenski korak mjerenja (siječanj - travanj)	10 minuta
Vremenski korak mjerenja (svibanj - prosinac)	Jedna minuta
Spektralni raspon	294 - 1100 nm
Spektralna ekstrapolacija	280 - 294 nm i 1100 - 4000 nm
Potpuni rekonstruirani spektar	280 - 4000 nm
Vrsta mjerenja	Ukupno spektralno ozračenje na vodoravnu plohu (spektralni G po valnim duljinama)
Kontrola kvalitete	Promjena K_t , zenitni kut, ukupno ozračenje



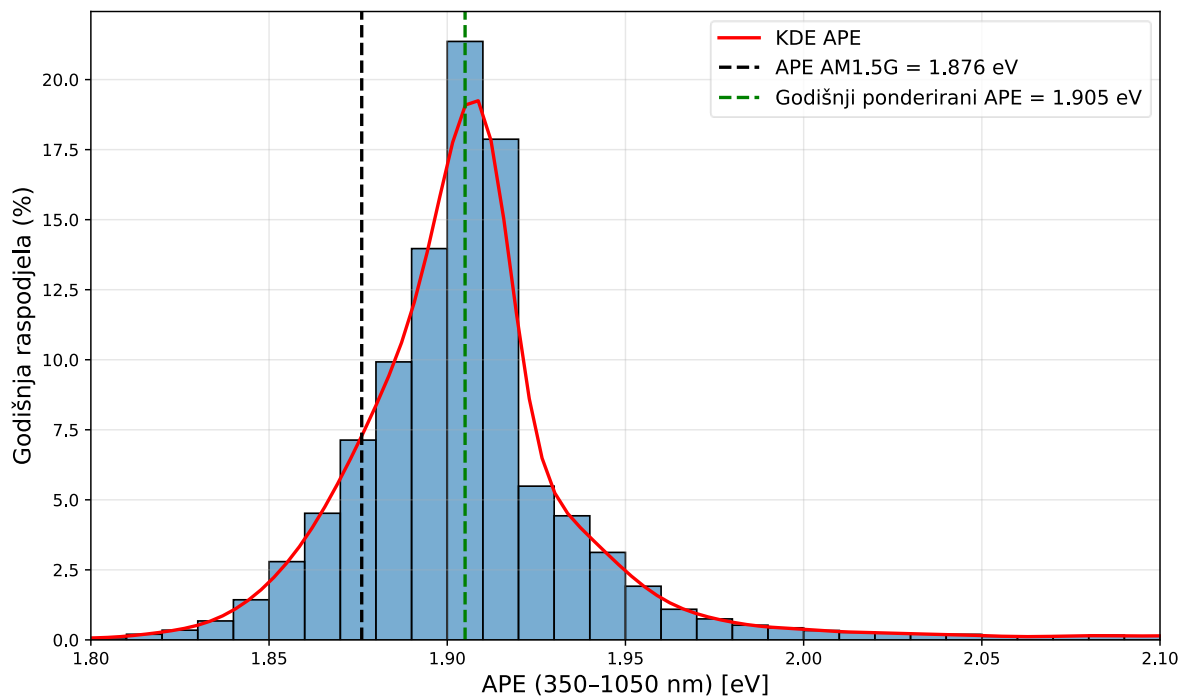
Slika 5.3 Usporedba integriranog ozračenja s MS-711 i ozračenja s piranometra - nefiltrirani podaci.



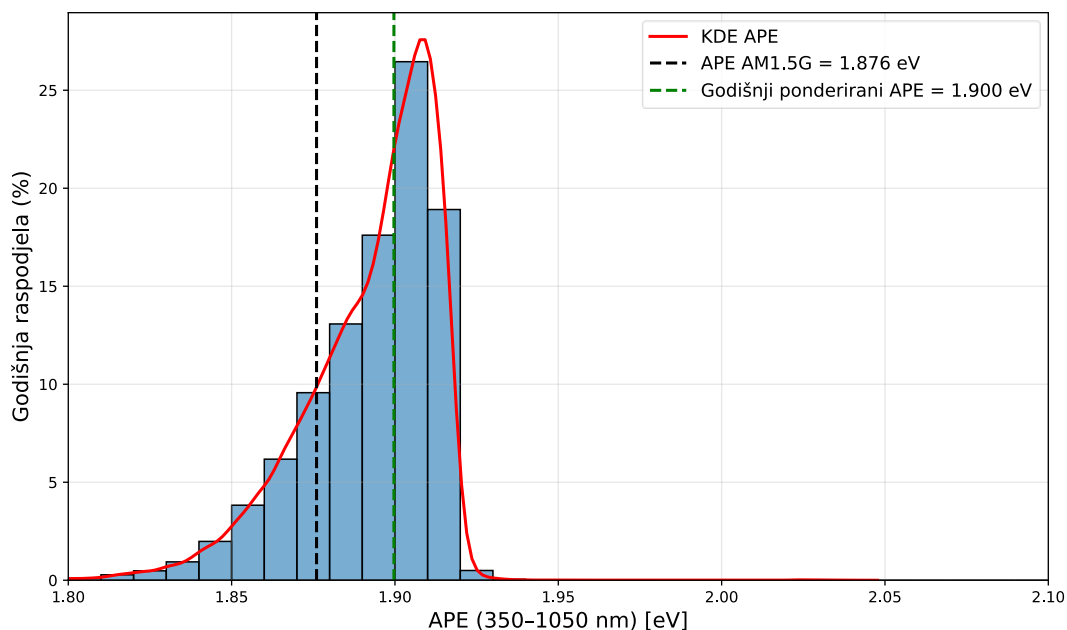
Slika 5.4 Usporedba integriranog ozračenja s MS-711 i ozračenja s piranometra - filtrirani podaci.

5.2. Prosječna energija fotona Sunčeva zračenja u Splitu

Na slikama 5.5 i 5.6 prikazani su histogrami trenutnih vrijednosti prosječne energije fotona za cijelu 2025. godinu, zajedno s glatkom KDE distribucijom. Iz prikaza je jasno vidljivo da velika većina mjerenja ima *APE* vrijednosti veće od referentne, što znači da je prosječni spektar u Splitu pomaknut prema plavom dijelu. To je u skladu s rezultatima simulacija koje su za istu lokaciju provedene primjenom FARMS-NIT modela, a koji su dani u trećem poglavlju. Distribucija za uvjete vedrog neba ($K_t > 0,85$) pokazuje da u tom podskupu nedostaje rep s najvećim *APE* vrijednostima, ali i tada je prosječan *APE* pomaknut prema višim vrijednostima u odnosu na referentni spektar. Najveće trenutne *APE* vrijednosti javljaju se pri oblačnim uvjetima, budući da se oblaci ponašaju poput filtra za dulje valne duljine: povećava se udio raspršene komponente u kojoj dominiraju kraće valne duljine i time raste *APE*. Ipak, oblačni periodi imaju mali utjecaj na godišnji ponderirani *APE*, jer se ponderiranje provodi ukupnim ozračenjem, a upravo u tim razdobljima je ono nisko.

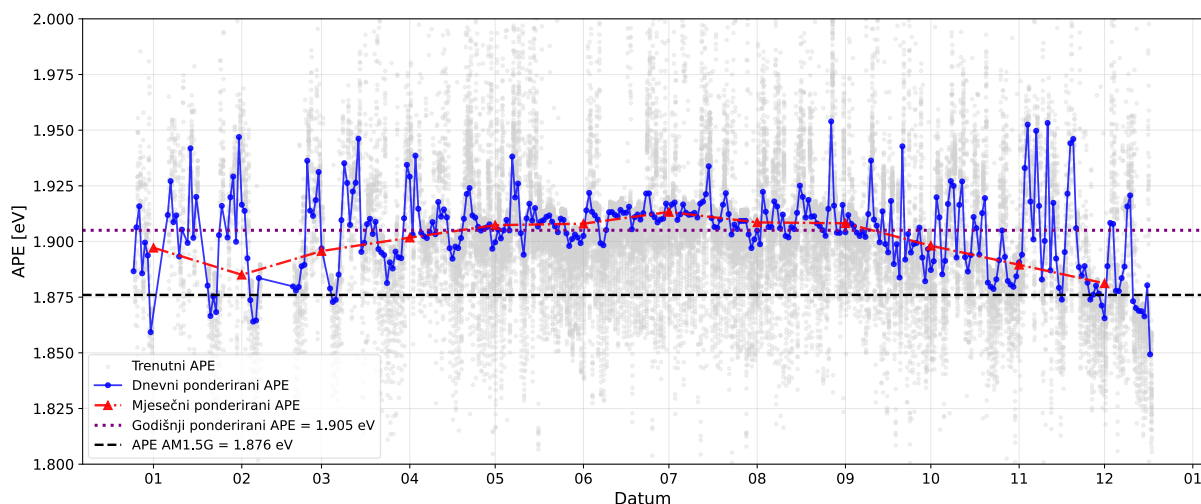


Slika 5.5 Godišnja distribucija *APE* vrijednosti za sve uvjete neba.

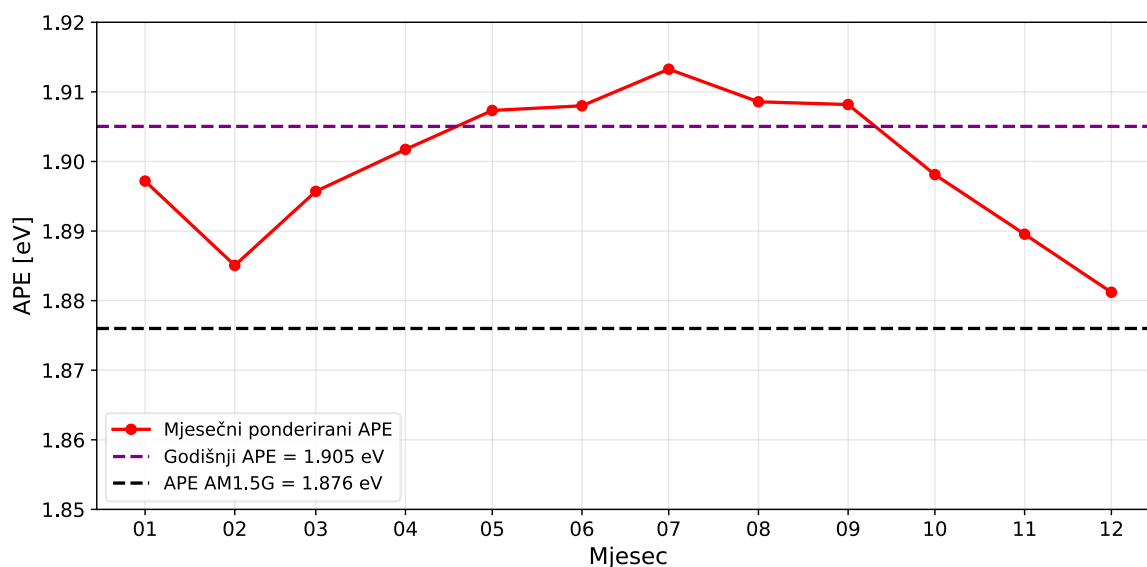


Slika 5.6 Godišnja distribucija APE vrijednosti za vedro nebo ($K_t > 0,85$).

Na slici 5.7 prikazane su trenutne vrijednosti *APE* te pripadne dnevne i mjesečne *APE* vrijednosti ponderirane ukupnim ozračenjem, a na slici 5.8 zbog preglednosti samo ponderirane mjesečne vrijednosti. Uočava se da su za Split mjesečne *APE* vrijednosti tijekom cijele godine veće od referentne *APE* vrijednosti, uz izraženu sezonalnost. S porastom mase zraka (*AM*) u kasnu jesen i zimu *APE* se smanjuje, što odražava opće pomicanje spektra prema crvenom dijelu; samo izrazito oblačni dani u tom razdoblju postižu veće trenutne *APE*, ali oni zbog niskog ozračenja slabo utječu na ponderirane dnevne i mjesečne vrijednosti. To se jasno očituje u tome što su zimske i jesenske mjesečne *APE* vrijednosti po iznosu znatno bliže vrijednostima za vedre dane nego onima za oblačne uvjete. U ljetnom razdoblju oscilacije su najmanje. Većina dnevnih i sve mjesečne ponderirane vrijednosti tada se nalaze vrlo blizu ili iznad godišnje ponderirane *APE* vrijednosti, te značajno iznad referentne vrijednosti. Godišnji ponderirani *APE* po iznosu je najbliži proljetnim i ljetnim mjesečnim vrijednostima, što je očekivano jer je upravo tada ukupno ozračenje najveće i ti mjeseci dominantno doprinose godišnjem energetsom i spektralnom prosjeku.



Slika 5.7 Trenutne, dnevne, mjesečne i godišnja APE vrijednost u Splitu za 2025. godinu.



Slika 5.8 Mjesečne APE vrijednosti za Split za 2025. godinu.

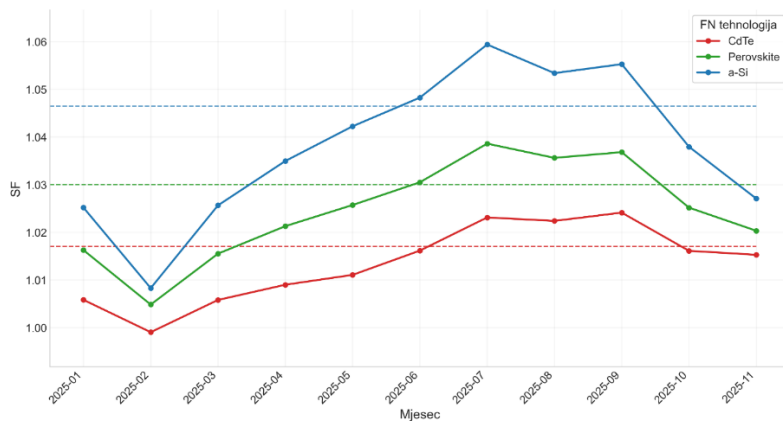
5.3. Faktor spektralne korekcije za Split za različite FN tehnologije

U sljedećem koraku izračunati su faktori spektralne korekcije (SF) na mjesečnoj i godišnjoj razini za devet FN tehnologija izravno iz spektralnih mjerenja i ukupnog ozračenja dobivenog integriranjem izmjenjenog i ekstrapoliranog spektra u području valnih duljina od 280 do 4000 nm. U idealnom slučaju ukupno ozračenje G bilo bi preuzeto iz mjerenja piranometra postavljenog na istoj lokaciji kao i spektrometar, no za promatrano vremensko razdoblje ne postoje mjerenja ozračenja na samoj lokaciji spektrometra. Podaci o ozračenju dobiveni od DHMZ-a dostupni su tek od sredine veljače 2025. i odnose se na mjernu postaju udaljenu približno tri kilometra zračne linije od mjesta spektralnih mjerenja. Dodatno, spektrometar

je smješten na krovnoj plohi fakulteta u urbanoj sredini, okružen drugim zgradama koje u pojedinim razdobljima zasjenjuju instrument, što otvara mogućnost da spektrometar i piranometar ne registriraju Sunčevo zračenje u istim uvjetima u istom trenutku. Zbog svega navedenog kao referentno ozračenje korišteno je ukupno ozračenje dobiveno integriranjem spektra, tj. za proračun SF vrijednosti uporabljena je jednačba 2.10, dok su ponderirane mjesečne i godišnje vrijednosti izračunate prema jednačbi 3.13. Mjerenja ozračenja s piranometra DHMZ-a u ovom su radu korištena isključivo za identifikaciju i eliminaciju vremenskih intervala s naglim promjenama naoblake, kako je detaljnije opisano u poglavlju 5.2.

Na slici 5.9 prikazane su mjesečne vrijednosti faktora spektralne korekcije SF za tri razmatrane FN tehnologije, a na slici 5.10 za preostalih šest tehnologija. U tablici 5.2 prikazane su mjesečne i godišnje srednje vrijednosti odabranih atmosferskih varijabli, pri čemu su za interpretaciju spektralnog ponašanja osobito važne optička masa zraka AM i indeks vedrine neba K_t . Dodatno, na slici 5.11 prikazana je trodimenzionalna distribucija AM vrijednosti za Split, a na slici 5.12 mjesečne vrijednosti AM i K_t , što omogućuje povezivanje sezonalnosti spektra s promjenama SF faktora.

Iz mjesečnih SF krivulja vidljivo je da sve tankoslojne tehnologije (a-Si, perovskit i CdTe) tijekom cijele godine u Splitu imaju SF veći od 1, tj. ostvaruju spektralne dobitke u odnosu na referentni spektar, uz izraženu sezonalnost. Kod a-Si i perovskita jasno se očituje ovisnost o optičkoj masi zraka: pri većem prosječnom mjesečnom AM (zima i kasna jesen) SF je niži, dok se pri nižem AM u ljetnim mjesecima značajno povećava, sa spektralnim dobitcima koji idu do 5,9% za a-Si i 3,8% za perovskit u srpnju. CdTe pokazuje blaže sezonske oscilacije; uz AM , važnu ulogu ima i sadržaj taložne vodene pare, kako je objašnjeno u trećem i četvrtom poglavlju. CIGS je tijekom cijele godine najbliži jediničnoj SF vrijednosti, što je očekivano s obzirom na vrlo širok spektralni odziv i posljedično manju osjetljivost na promjene spektralne distribucije ozračenja. Za CIGS i mono-Si PERC uočava se “suprotan” oblik mjesečnih SF krivulja u odnosu na tankoslojne tehnologije: oni postižu više SF vrijednosti u mjesecima kada je APE niži, tj. kada je spektar bliži referentnom, dok u ljetnom razdoblju s izraženije plavim spektrom bilježe niže SF vrijednosti.

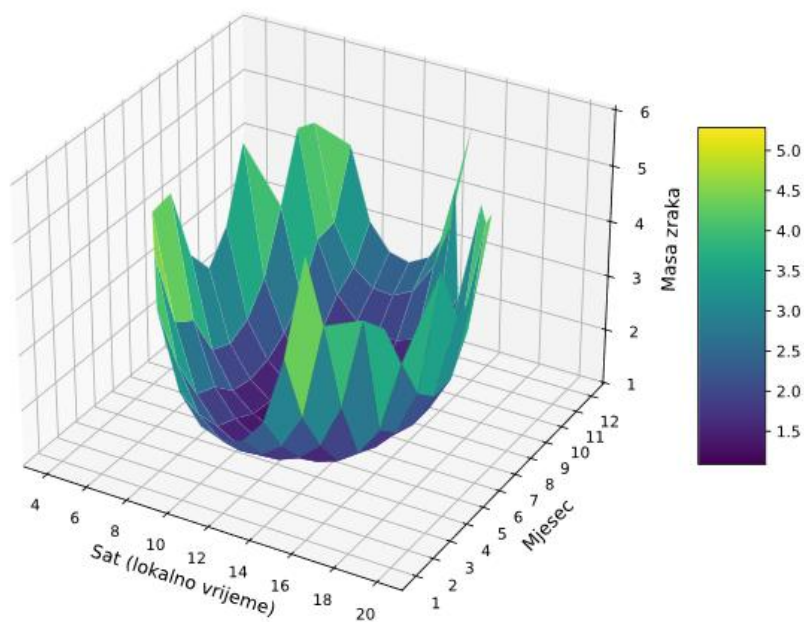


Slika 5.9 Faktor spektralne korekcije za a-Si, Perovskit i CdTe.



Slika 5.10 Faktor spektralne korekcije za tehnologije kristalnog silicija, CIGS i CZTSSe.

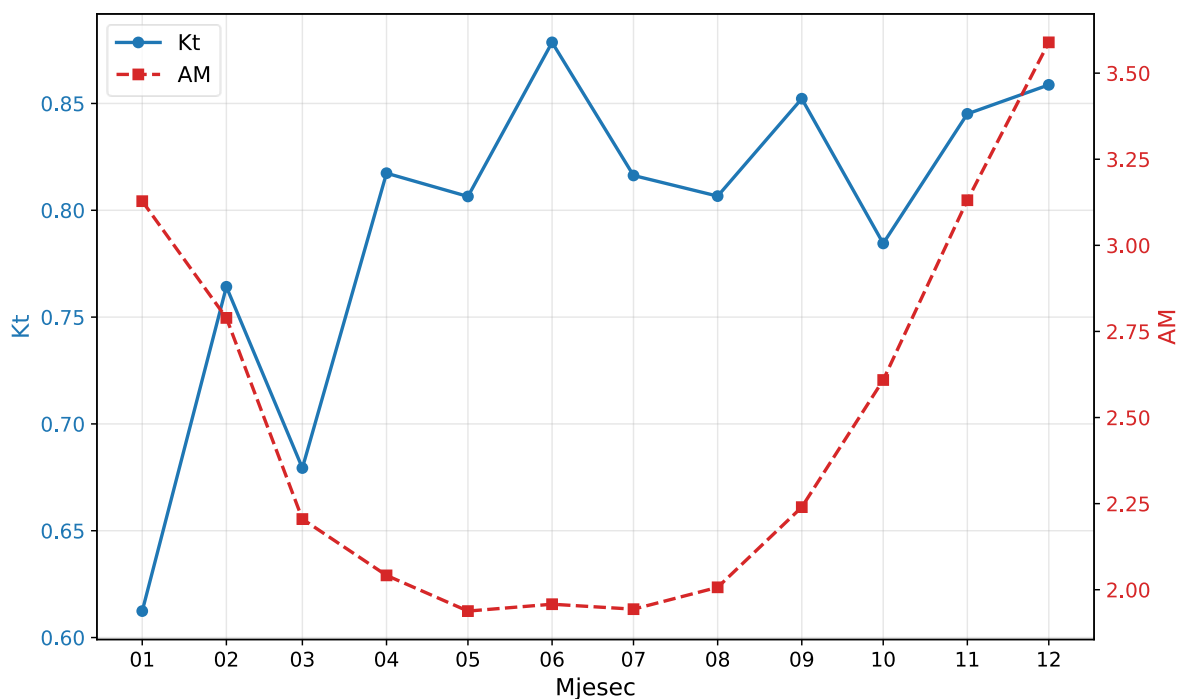
Zanimljivo lokalno odstupanje pojavljuje se između siječnja i veljače. Iako bi se intuitivno očekivale niže SF vrijednosti u siječnju, budući da je AM u siječnju veći nego u veljači, mjesečne APE i SF vrijednosti pokazuju suprotno ponašanje. Analiza meteoroloških uvjeta otkriva da je siječanj bio izrazito oblačan, a veljača izrazito vedra. Oblačno vrijeme u siječnju (nizak K_t) “poništilo” je očekivani učinak velike optičke mase zraka na spektralni pomak: zbog dominantnije raspršene komponente, s naglaskom na kraće valne duljine, APE je ostao relativno visok usprkos većem AM . U veljači su, naprotiv, pretežito vedri dani u kombinaciji s i dalje relativno visokim AM doveli do niže APE vrijednosti, odnosno spektra bližeg referentnom. Posljedično, SF tankoslojnih tehnologija u veljači je niži nego u siječnju, dok ostale tehnologije pokazuju suprotan trend (veći SF u veljači nego u siječnju).



Slika 5.11 3D prikaz vrijednosti mase zraka za Split za cijelu godinu.

Tablica 5.3 Prosječne mjesečne vrijednosti određenih atmosferskih varijabli.

Mjesec	Ukupno ozračenje	Ozračenje za vedro nebo	K_t	θ_z	AM
1	195	330	0,61	69,3	3,13
2	290	394	0,76	65,5	2,79
3	346	524	0,68	57,2	2,21
4	459	565	0,82	52,0	2,04
5	500	610	0,81	47,9	1,94
6	546	605	0,88	46,7	1,96
7	505	607	0,82	47,0	1,94
8	468	572	0,81	50,4	2,00
9	421	499	0,85	56,5	2,24
10	334	425	0,78	63,1	2,61
11	264	320	0,84	68,9	3,13
12	236	279	0,86	72,1	3,59
Godina	Ukupno ozračenje	Ozračenje za vedro nebo	K_t	θ_z	AM
2025.	466	515	0,82	54,83	2,30



Slika 5.12 Mjesečne vrijednosti AM i K_t .

Na godišnjoj razini dobiveni SF faktori dodatno kvantificiraju opisane efekte. Za a-Si godišnji SF iznosi 1,0465, što odgovara spektralnoj dobiti od +4,65% u odnosu na referentni spektar. Perovskit bilježi godišnji SF od oko 1,0300 (+3,0%), a CdTe približno 1,0171 (+1,71%), pa se može zaključiti da sve tri tankoslojne tehnologije ostvaruju stabilnu, ali različito izraženu spektralnu dobit. CIGS i CZTSSe pokazuju godišnje SF faktore od približno 0,989 (-1,1%), što znači da u prosjeku ostvaruju blago negativan spektralni učinak u odnosu na referentni spektar. Ipak, njihov vrlo širok spektralni odziv rezultira time da su mjesečne SF krivulje relativno glatke i bez naglašenih sezonskih ekstrema, pa je njihova relativna osjetljivost na sezonske promjene spektra manja nego kod tankoslojnih tehnologija s užim spektralnim prozorom. Mono-Si PERC i mono-Si PERT postižu godišnji SF od oko 0,9929 (-0,7%), dok poli-Si ima SF od približno 0,9951 (-0,5%) odnosno 0,9929 (-0,7%). Mono-Si HJT se nalazi na donjoj granici raspona s godišnjim SF od oko 0,9891 (-1,1%). Ovi rezultati ukazuju na to da spektar u Splitu većinu godine pogoduje tehnologijama s pojačanim spektralnim odzivom u kratkovalnom području, dok konvencionalne kristalne silicijeve tehnologije ćelije bilježe blago smanjenu učinkovitost u odnosu na referentne spektralne uvjete.

Tablica 5.4 Godišnje vrijednosti APE i SF faktora za 9 FN tehnologija.

Velicina	Vrijednost
Godišnji ponderirani APE	1,905
SF a-Si	+4,65%
SF perovskit	+3,0%
SF CdTe	+1,71%
SF CIGS	-0,5%
SF CZTSSe	-1,10%
SF mono-Si HJT	-1,09%
SF mono-Si PERC	-0,71%
SF mono-Si PERT	-0,71%
SF poli-Si Al-BSF	-0,49%

6. ZAKLJUČAK

Precizno modeliranje rada FN modula i sustava u cjelini od velike je važnosti zbog sve većeg udjela ovih izvora energije u ukupnom elektroenergetskom sustavu. Utjecaji ozračenja i temperature na rad FN modula dobro su istraženi i postoje precizni modeli koji matematički opisuju taj utjecaj. S druge strane, spektar Sunčeva zračenja najčešće se svodi na korištenje referentnog AM 1,5 spektra, čime se u potpunosti zanemaruje njegov utjecaj na rad FN modula. To dovodi do sustavnih pogrešaka u procjeni energetske prinosa. Stoga je motivacija ove disertacije istraživanje utjecaja spektra Sunčeva zračenja na učinkovitost rada FN modula.

Najprije je opisana prostorno-vremenska metodologija za analizu spektralnog utjecaja na rad FN modula na razini europskog kontinenta. Metodologija se temelji na višegodišnjim satelitskim podacima. Spektralne karakteristike Sunčeva zračenja su opisane prosječnom energijom fotona (*APE*) i faktorom spektralne korekcije (*SF*). Rezultati pokazuju da se utjecaj spektra znatno razlikuje između lokacija: kristalni silicij u prosjeku pokazuje znatno manje godišnje spektralne varijacije, dok tankoslojne tehnologije (a-Si, CdTe, perovskit) ostvaruju znatno veće dobitke ili gubitke ovisno o lokalnim atmosferskim uvjetima i širini zabranjenog pojasa. Napravljena je i vremenska analiza za osam lokacija za tri promatrane godine (2017.-2019.). Analiziran je odnos između pojedinih atmosferskih varijabli i faktora spektralne korekcije. U konačnici je predstavljena klasifikacija analiziranih lokacija na temelju iznosa faktora spektralne korekcije.

U drugom dijelu rada razvijen je novi model spektralne korekcije koji kombinira metode strojnog učenja s klasičnom linearnom regresijom. Razvijene su dvije verzije modela, za sve uvjete neba i za vedro nebo. Metoda slučajne šume korištena je za selekciju značajki, tj. identifikaciju najrelevantnijih fizikalnih varijabli i njihovih matematičkih transformacija. Konačni linearni model za devet FN tehnologija kalibriran je metodom najmanjih kvadrata. Postupak prilagodbe koeficijenata temelji se na dvostupanjskoj strategiji. Naime, najprije je napravljena peterostruka unakrsna validacija, a zatim prilagodba koeficijenata na cjelokupnom skupu podataka. Nakon toga napravljena je i validacija na svakoj lokaciji pojedinačno, a zatim na neovisnom skupu podataka.

U usporedbi s referentnim modelima iz literature (Sandia SAPM, PVSPEC), predloženi model za sve uvjete neba pokazuje konzistentno smanjenje ozračenjem ponderiranih metrika wMAE, wRMSE i wMBE za svih devet analiziranih FN tehnologija. Prosječno gledano, wMAE je smanjena za približno jednu petinu u odnosu na Sandia i PVSPEC modele, dok su redukcije

wRMSE usporedive ili veće, osobito za tankoslojne tehnologije kod kojih je spektralna osjetljivost izraženija. Dodatno, predloženi model značajno smanjuje ozračanjem ponderiranu pristranost wMBE, čime se umanjuje sustavno precjenjivanje ili podcjenjivanje energetskog prinosa i pokazuje da dobici ne nastaju samo kao artefakt vremenskog prosjeka, nego upravo u energetskim vršnim trenucima.

Za uvjete vedrog neba razvijen je specijalizirani model koji eksplicitno uključuje taložnu vodenu paru, optičku dubinu aerosola i Ångströmov eksponent, koristeći podatke dobivene iz filtarskih radiometara i AERONET infrastrukture. Ovaj model pokazuje još izraženiju točnost u odnosu na modele vedrog neba iz literature (FS2, FS3, Caballerov model), s tipičnim smanjenjima wMAE i wRMSE reda 30-40% za većinu tehnologija, te približno upola manjom apsolutnom vrijednošću wMBE u odnosu na Caballerov pristup. Rezultati potvrđuju da dodatno iskorištavanje informacija o vodenoj pari i aerosolu omogućuje znatno precizniji opis spektralnih promjena pri vedrom nebu.

Treći dio rada obuhvaća uspostavu prve platforme za kontinuirano mjerenje spektra Sunčeva zračenja u Republici Hrvatskoj, smještene na FESB-u u Splitu. Provedena su cjelogodišnja mjerenja tijekom 2025. godine. Mjerenja spektrometrom EKO MS-711 provedena su u rasponu 294-1100 nm. Analiza mjerenja potvrdila je značajne sezonske spektralne varijacije. Uspostava ove mjerne postaje i prikupljeni jednogodišnji skup podataka predstavljaju referentnu infrastrukturu za daljnja spektralna istraživanja na nacionalnoj razini.

Dobiveni rezultati potvrđuju postavljene hipoteze. Prvo, pokazano je da je moguće razviti model spektralne korekcije koji se oslanja na atmosferske varijable dostupne na velikom broju lokacija, a koji istovremeno postiže manju pogrešku od modela iz literature. Bitno je istaknuti da su modeli razvijeni za devet FN tehnologija i za dva atmosferska režima. Drugo, prostorno-vremenski pristup temeljen na sintetiziranom spektru dobivenom na temelju satelitskih podataka i eksperimentalno dobivenim spektralnim odzivima pokazao se pogodnim za preciznu kvantifikaciju spektralnog utjecaja u različitim klimatskim regijama. Zahvaljujući tome, napravljena je spektralno utemeljena klasifikacija europskih lokacija. Treće, eksperimentalna postava i prikupljeni podaci u Splitu predstavljaju vrijedan novi izvor informacija o spektru Sunčeva zračenja u mediteranskoj klimi, čime se značajno nadopunjuje postojeća baza znanja u području u kojem su kontinuirana spektralna mjerenja dostupna na jako malom broju lokacija.

Ograničenja provedenog istraživanja odnose se na broj analiziranih lokacija za razvoj modela. Iako su u obzir uzete tri lokacije s veoma različitim klimatskim karakteristikama, bilo bi dobro uključiti još nekoliko njih. Što se tiče mjerenja provedenih na zgradi FESB-a, glavni nedostatak

predstavlja nedostatak mjerenja ukupnog ozračenja piranometrom. Zbog toga je za proračun *SF-a* moralo biti korišteno ukupno ozračenje dobiveno ekstrapolacijom spektra na područje valnih duljina 280-4000 nm.

Budući rad svakako će se nadovezati na uočene prednosti i ograničenja. Potencijalna proširenja uključuju prilagodbu razvijenog modela na bifacijalne i višespojne FN module i širenje analize na dodatne klimatske zone. Planirana je i validacija razvijenog modela korištenjem mjerenih podataka iz Splita. Da bi to bilo moguće, potrebno je instalirati piranometar i meteorološku postaju s osnovnim mjerenjima (tlak, temperatura, relativna vlažnost zraka) s minutnom rezolucijom na krov FESB-ove zgrade.

LITERATURA

- [1] Thoning KW, Crotwell AM, Mund JW. Atmospheric Carbon Dioxide Dry Air Mole Fractions from continuous measurements at Mauna Loa, Hawaii, Barrow, Alaska, American Samoa and South Pole, 1973-present. Boulder, Colorado, USA: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Global Monitoring Laboratory (GML); 2025.
- [2] Fraunhofer ISE: Photovoltaics Report. Freiburg, Germany: 2024.
- [3] Vezzoni R. Green growth for whom, how and why? The REPowerEU Plan and the inconsistencies of European Union energy policy. *Energy Res Soc Sci* 2023;101. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103134>.
- [4] Jiang T, He X, Su B, Havea PH, Wei K, Kundzewicz ZW, et al. COP 28: Challenge of coping with climate crisis. *The Innovation* 2024;5. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2023.100559>.
- [5] World Energy Outlook 2024. n.d.
- [6] Theristis M, Stein J, Anderson K, Hansen C, Deville L. PV Performance Modeling and Stakeholder Engagement - Final Technical Report. Albuquerque, NM, and Livermore, CA, USA: 2024. <https://doi.org/10.2172/2516816>.
- [7] Performance and Reliability of Photovoltaic Systems: Evaluations of Large-Scale Monitoring Data. COST Action PEARL PV (CA16235) 2022.
- [8] Minemoto T, Toda M, Nagae S, Gotoh M, Nakajima A, Yamamoto K, 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* 2007;91:120–2. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2006.07.014>.
- [9] Photovoltaic devices - Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data, IEC 60904-3. 2019.
- [10] Riordan CJ, Hulstrom RL. Summary of studies that examine the effects of spectral solar radiation variations on PV (photovoltaic) device design and performance. Golden, CO, USA: 1989. <https://doi.org/10.2172/6222971>.
- [11] Hirata Y, Tani T. Evaluation of photovoltaic modules considering spectral solar radiation. *Electrical Engineering in Japan* 1994;114:93–105. <https://doi.org/10.1002/eej.4391140807>.
- [12] Hirata Y, Tani T. Output variation of photovoltaic modules with environmental factors—I. The effect of spectral solar radiation on photovoltaic module output. *Solar Energy* 1995;55:463–8. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(95\)00063-W](https://doi.org/10.1016/0038-092X(95)00063-W).
- [13] Nann S, Emery K. Spectral effects on PV-device rating. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 1992;27:189–216. [https://doi.org/10.1016/0927-0248\(92\)90083-2](https://doi.org/10.1016/0927-0248(92)90083-2).
- [14] European Commission JRC (JRC). Joint Research Centre (JRC). <https://Joint-Research-CentreEcEuropaEu/> 2025.
- [15] National Renewable Energy Laboratory n.d.
- [16] Sandia National Laboratories n.d.
- [17] Conde Mendoza LA, Montes Romero J, Carhuavilca Vela AM, Perich Ibañez RA, Guerra Torres JA, Sevillano Bendezú MA, et al. Puesta en marcha de un laboratorio para la caracterización de tecnologías fotovoltaicas a sol real bajo las condiciones climáticas de Lima. *Tecnia* 2020;30:80–9. <https://doi.org/10.21754/tecnica.v30i1.835>.
- [18] PVsyst SA. PVsyst (Version 8.0.18). PC software for the study, sizing, simulation and data analysis of complete PV systems 2025.
- [19] Valentin Software. PVSOL premium* (Version 2024) 2024.
- [20] Betti T, Bevanda I, Marasović I, Zulim I. A new approach to comparing photovoltaic simulation software. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects* 2023;45:6290–304. <https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2215196>.
- [21] Bevanda I, Betti T, Marić P, Marasović I. Evaluating the performance of photovoltaic simulation tools: case study of grid-connected 31 kWp photovoltaic system. 2022 7th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech), IEEE; 2022, p. 1–5. <https://doi.org/10.23919/SpliTech55088.2022.9854237>.
- [22] Bevanda I, Betti T, Marić P, Marasović I. Comparative Study of Modeled and Measured Spectral Irradiance for PV Technology Applications. 2025 10th International Conference on

- Smart and Sustainable Technologies (SpliTech), IEEE; 2025, p. 1–6.
<https://doi.org/10.23919/SpliTech65624.2025.11091757>.
- [23] Aminul Islam M, M. Kassim N, Ahmed Alkahtani A, Amin N. Assessing the Impact of Spectral Irradiance on the Performance of Different Photovoltaic Technologies. *Solar Radiation - Measurement, Modeling and Forecasting Techniques for Photovoltaic Solar Energy Applications*, IntechOpen; 2022, p. 1–29. <https://doi.org/10.5772/intechopen.96697>.
- [24] Dirnberger D, Blackburn G, Müller B, Reise C. On the impact of solar spectral irradiance on the yield of different PV technologies. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2015;132:431–42. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.09.034>.
- [25] Eke R, Betts TR, Gottschalg R. Spectral irradiance effects on the outdoor performance of photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2017;69:429–34. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.062>.
- [26] Amillo AMG, Huld T, Vourlioti P, Müller R, Norton M. Application of satellite-based spectrally-resolved solar radiation data to PV performance studies. *Energies (Basel)* 2015;8:3455–88. <https://doi.org/10.3390/en8053455>.
- [27] Polo J, Alonso-Abella M, Ruiz-Arias JA, Balenzategui JL. Worldwide analysis of spectral factors for seven photovoltaic technologies. *Solar Energy* 2017;142:194–203. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.024>.
- [28] Alonso-Abella M, Chenlo F, Nofuentes G, Torres-Ramírez M. Analysis of spectral effects on the energy yield of different PV (photovoltaic) technologies: The case of four specific sites. *Energy* 2014;67:435–43. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.01.024>.
- [29] Gottschalg R, Betts TR, Infield DG, Kearney MJ. On the importance of considering the incident spectrum when measuring the outdoor performance of amorphous silicon photovoltaic devices. *Meas Sci Technol* 2004;15:460–6. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/15/2/021>.
- [30] Kinsey GS. Solar cell efficiency divergence due to operating spectrum variation. *Solar Energy* 2021;217:49–57. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.024>.
- [31] Conde LA, Angulo JR, Sevillano-Bendezú M, Nofuentes G, Töfflinger JA, de la Casa J. Spectral effects on the energy yield of various photovoltaic technologies in Lima (Peru). *Energy* 2021;223:1–7. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120034>.
- [32] Bevanda I, Marić P, Kristić A, Betti T. Assessing the Impact of Solar Spectral Variability on the Performance of Photovoltaic Technologies Across European Climates. *Energies (Basel)* 2025;18:3868. <https://doi.org/10.3390/en18143868>.
- [33] Kinsey GS, Riedel-Lyngskaer NC, Alonso-Abella M, Boyd M, Braga M, Chunhui S, et al. Impact of measured spectrum variation on solar photovoltaic efficiencies worldwide. 2022.
- [34] Lindsay N, Libois Q, Badosa J, Migan-Dubois A, Bourdin V. Errors in PV power modelling due to the lack of spectral and angular details of solar irradiance inputs. *Solar Energy* 2020;197:266–78. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.12.042>.
- [35] Leitão D, Torres JPN, Fernandes JFP. Spectral Irradiance Influence on Solar Cells Efficiency. *Energies (Basel)* 2020;13:5017. <https://doi.org/10.3390/en13195017>.
- [36] Ruben Vogt M, María Gracia Amillo A, Maham K, Vogt MR, Riechelmann S, Gracia-Amillo AM, et al. Interlaboratory Comparison of the PV Module Energy Rating Standard IEC 61853-3 2020. <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20202020-4BO.13.2>.
- [37] Ruben Vogt M, Riechelmann S, Gracia-Amillo AM, Driesse A, Kokka A, Maham K, et al. PV Module Energy Rating Standard IEC 61853-3 Intercomparison and Best Practice Guidelines for Implementation and Validation. *IEEE J Photovolt* 2022;12:844–52. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2021.3135258>.
- [38] Shnishil AH, Chid SS, Yaseen MJ, Alwana TJ. Influence of air mass on the performance of many types of PV modulus in Baghdad. *Energy Procedia*, vol. 6, Elsevier Ltd; 2011, p. 153–9. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.05.018>.
- [39] Sadiq Reza K. The impact of air mass on photovoltaic panel performance 2016. <https://doi.org/10.18282/ser.v1.i1.41>.
- [40] Kenny RP, Ioannides A, Müllejans H, Zaaiman W, Dunlop ED. Performance of thin film PV modules. *Thin Solid Films* 2006;511–512:663–72. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.11.066>.

- [41] Rodziewicz T, Rajfur M. Numerical procedures and their practical application in PV modules analyses. Part I: air mass. *Opto-Electronics Review* 2019;27:39–57. <https://doi.org/10.1016/j.opelre.2019.02.002>.
- [42] King DL. Photovoltaic module and array performance characterization methods for all system operating conditions, AIP Publishing; 2008, p. 347–68. <https://doi.org/10.1063/1.52852>.
- [43] King DL, Kratochvil JA, Boyson WE. Measuring solar spectral and angle-of-incidence effects on photovoltaic modules and solar irradiance sensors. *Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1997, Anaheim, CA, USA: 1997*. <https://doi.org/10.1109/PVSC.1997.654283>.
- [44] Nelson L, Frichtl M, Panchula A. Changes in cadmium telluride photovoltaic system performance due to spectrum. *IEEE J Photovolt* 2013;3:488–93. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2012.2226868>.
- [45] Lee M, Ngan L, Hayes W, Sorensen J, Panchula AF. Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2015 IEEE 42nd. 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), New Orleans, LA, USA: IEEE; 2015. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2015.7356003>.
- [46] Pelland S, Gueymard CA. Validation of Photovoltaic Spectral Effects Derived From Satellite-Based Solar Irradiance Products 2022. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.20089658.v1>.
- [47] Lee M, Panchula A. Spectral correction for photovoltaic module performance based on air mass and precipitable water. 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Portland, OR, USA: IEEE; 2016, p. 1351–6. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2016.7749836>.
- [48] Curran AJ, Lin B, Deng Y. Simple Spectral Model for Module Performance Based on FARMS-NIT Predictions. 2024 IEEE 52nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), IEEE; 2024, p. 1237–41. <https://doi.org/10.1109/PVSC57443.2024.10749426>.
- [49] Bauer E. The Scattering of Infrared Radiation from Clouds. 1964.
- [50] Blau HH, Espinola RP, Reifenstein EC. Near Infrared Scattering by Sunlit Terrestrial Clouds. 1966.
- [51] Feister U, Cabrol N, Häder D. UV irradiance enhancements by scattering of solar radiation from clouds. *Atmosphere (Basel)* 2015;6:1211–28. <https://doi.org/10.3390/atmos6081211>.
- [52] Calbó J, Pagès D, González JA. Empirical studies of cloud effects on UV radiation: A review. *Reviews of Geophysics* 2005;43:1–28. <https://doi.org/10.1029/2004RG000155>.
- [53] Pelland S, Beswick C, Thevenard D, Cote A, Pai A, Poissant Y. Development and Testing of the PVSPEC Model of Photovoltaic Spectral Mismatch Factor. *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, vol. 2020- June, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2020, p. 1258–64. <https://doi.org/10.1109/PVSC45281.2020.9300932>.
- [54] Huld T, Sample T, Dunlop ED. A simple model for estimating the influence of spectrum variations on PV performance. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, Germany; 2009.
- [55] Sweerts B, Pfenninger S, Yang S, Folini D, van der Zwaan B, Wild M. Estimation of losses in solar energy production from air pollution in China since 1960 using surface radiation data. *Nat Energy* 2019;4:657–63. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0412-4>.
- [56] Neher I, Buchmann T, Crewell S, Pospichal B, Meilinger S. Impact of atmospheric aerosols on solar power. *Meteorologische Zeitschrift* 2019;28:305–21. <https://doi.org/10.1127/metz/2019/0969>.
- [57] Dincer I. *Comprehensive energy systems*. Elsevier; 2018.
- [58] Kalogirou S. *McEvoy's Handbook of Photovoltaics, Third Edition: Fundamentals and Applications*. 3rd ed. Academic Press; 2017.
- [59] Theristis M, Fernandez EF, Almonacid F, Perez-Higueras P. Spectral Corrections Based on Air Mass, Aerosol Optical Depth, and Precipitable Water for CPV Performance Modeling. *IEEE J Photovolt* 2016;6:1598–604. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2016.2606702>.
- [60] Caballero JA, Fernández EF, Theristis M, Almonacid F, Nofuentes G. Spectral Corrections Based on Air Mass, Aerosol Optical Depth, and Precipitable Water for PV Performance Modeling. *IEEE J Photovolt* 2018;8:552–8. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2017.2787019>.
- [61] Holben BN, Eck TF, Slutsker I, Tanré D, Buis JP, Setzer A, et al. AERONET-A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization tion of a new Sun-sky scanning radiometer system that. vol. 66. 1998.

- [62] Gueymard CA, Yang D. Worldwide validation of CAMS and MERRA-2 reanalysis aerosol optical depth products using 15 years of AERONET observations. *Atmos Environ* 2020;225. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117216>.
- [63] Wang J, Zhang L, Dai A, Van Hove T, Van Baelen J. A near-global, 2-hourly data set of atmospheric precipitable water from ground-based GPS measurements. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 2007;112. <https://doi.org/10.1029/2006JD007529>.
- [64] Daxini R, Sun Y, Wilson R, Wu Y. Direct spectral distribution characterisation using the Average Photon Energy for improved photovoltaic performance modelling. *Renew Energy* 2022;201:1176–88. <https://doi.org/10.5439/10522>.
- [65] Daxini R, Wu Y, Wilson R. Improvement of the Average Photon Energy spectral correction function for photovoltaic performance forecasting. 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Milan, Italy: 2022, p. 740–3. <https://doi.org/10.4229/WCPEC-82022-3BV.3.49>.
- [66] Daxini R, Wilson R, Wu Y. 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* 2023;284:129046. <https://doi.org/10.5439/10522>.
- [67] Ishii T, Otani K, Itagaki A, Utsunomiya K. 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* 2012;51. <https://doi.org/10.1143/JJAP.51.10NF05>.
- [68] Rodziewicz T, Rajfur M. Numerical procedures and their practical application in PV modules' analyses. Part II: Useful fractions and APE. *Opto-Electronics Review* 2019;27:149–60. <https://doi.org/10.1016/j.opelre.2019.05.004>.
- [69] Piliouguine M, Elizondo D, Mora-López L, Sidrach-de-Cardona M. Multilayer perceptron applied to the estimation of the influence of the solar spectral distribution on thin-film photovoltaic modules. *Appl Energy* 2013;112:610–7. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.053>.
- [70] Moreno-Sáez R, Mora-López L. Modelling the distribution of solar spectral irradiance using data mining techniques. *Environmental Modelling and Software* 2014;53:163–72. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.002>.
- [71] Cornaro C, Andreotti A. Influence of Average Photon Energy index on solar irradiance characteristics and outdoor performance of photovoltaic modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 2013;21:996–1003. <https://doi.org/10.1002/pip.2194>.
- [72] Daxini R, Wu Y. Review of methods to account for the solar spectral influence on photovoltaic device performance. *Energy* 2024;286. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129461>.
- [73] Ascencio-Vásquez J, Brecl K, Topič M. Methodology of Köppen-Geiger-Photovoltaic climate classification and implications to worldwide mapping of PV system performance. *Solar Energy* 2019;191:672–85. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.072>.
- [74] Habte A, Andreas A, Ottoson L, Gueymard C, Fedor G, Fowler S, et al. Indoor and Outdoor Spectroradiometer Intercomparison for Spectral Irradiance Measurement. Golden, CO (United States): 2014. <https://doi.org/10.2172/1134121>.
- [75] Tadashi Kato, Yanqun Xue, Takeshi Aoshima, Hasegawa T. Development of a broadband spectroradiometer. 2008 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, IEEE; 2008, p. 1–4. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2008.4922581>.
- [76] Gröbner J, Kouremeti N. The Precision Solar Spectroradiometer (PSR) for direct solar irradiance measurements. *Solar Energy* 2019;185:199–210. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.060>.
- [77] García-Cabrera RD, Cuevas-Agulló E, Barreto Á, Cachorro VE, Pó M, Ramos R, et al. Aerosol retrievals from the EKO MS-711 spectral direct irradiance measurements and corrections of the circumsolar radiation. *Atmos Meas Tech* 2020;13:2601–21. <https://doi.org/10.5194/amt-13-2601-2020>.
- [78] NREL SRRL. <https://midcdmz.nrel.gov/apps/sitehome.pl?site=BMS>. s Interneta 2025.
- [79] MOL-RAO Lindenberg. <https://www.dwd.de/EN/aboutus/locations/observatories/mol/mol.html>. s Interneta 2025.
- [80] Field Spectroscopy Guide with SVC i-series Spectroradiometers. NY, USA: 2019.

- [81] Osterwald CR, Emery KA, Myers DR, Riordan CJ. Extending the spectral range of silicon-based direct-beam solar spectral radiometric measurements. Conference Record of the Twentieth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, IEEE; 1988, p. 1246–50 vol.2. <https://doi.org/10.1109/PVSC.1988.105904>.
- [82] Tettamanti A. DEVELOPMENT OF A NOVEL SUNPHOTOMETER FOR AEROSOL AND DUST CHARACTERIZATION IN THE ATMOSPHERE. 2019.
- [83] Barreto Á, Cuevas E, Granados-Muñoz M-J, Alados-Arboledas L, Romero PM, Gröbner J, et al. The new sun-sky-lunar Cimel CE318-T multiband photometer – a comprehensive performance evaluation. *Atmos Meas Tech* 2016;9:631–54. <https://doi.org/10.5194/amt-9-631-2016>.
- [84] Holben BN, Eck TF, Slutsker I, Tanré D, Buis JP, Setzer A, et al. AERONET—A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. *Remote Sens Environ* 1998;66:1–16. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00031-5).
- [85] Tatsiankou V, Hinzer K, Schriemer H, McVey-White P, Beal R. Efficient, Real-Time Global Spectral and Broadband Irradiance Acquisition. 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC), IEEE; 2018, p. 2362–5. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2018.8547671>.
- [86] Bird RE, Hulstrom RL, Kliman AW, Eldering HG. Solar spectral measurements in the terrestrial environment. *Appl Opt* 1982;21:1430. <https://doi.org/10.1364/AO.21.001430>.
- [87] Pavanello D, Alessandrini S, Thiel C. International Spectroradiometer Intercomparison 2023 - Final report. Ispra, Italy: 2024.
- [88] Pavanello D, Alessandrini S, Thiel C. International Spectroradiometer Intercomparison 2024 - Final report. Ispra, Italy: 2025. <https://doi.org/10.2760/7023588>.
- [89] Sengupta M, Habte A, Xie Y, Gotseff P. Solar Radiation Research Laboratory (SRRL) Final Report: Fiscal Years 2019–2021. Golden, Colorado, USA: 2022.
- [90] Honsberg CB, Bowden SG. Photovoltaics Education Website. www.PveducationOrg 2019.
- [91] Karmalawi AM, Rayan DA, Rashad MM. Establishment and evaluation of photovoltaic quantum efficiency system at central metallurgical research and development institute. *Optik (Stuttg)* 2020;217:164931. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164931>.
- [92] Gueymard C. 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.
- [93] Kärhä P, Baumgartner H, Askola J, Kylmänen K, Oksanen B, Maham K, et al. Measurement setup for differential spectral responsivity of solar cells. *Opt Rev* 2020;27:195–204. <https://doi.org/10.1007/s10043-020-00584-x>.
- [94] Topič M, Brecl K, Sites J. Effective efficiency of PV modules under field conditions. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 2007;15:19–26. <https://doi.org/10.1002/pip.717>.
- [95] International Electrotechnical Commission. Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating - Part 1: Irradiance and temperature performance measurements and power rating, IEC 61853-1. Geneva, Switzerland: 2011.
- [96] St.Hilaire L, Janssen E. IEC 61853-1: Photovoltaic module performance testing and energy rating assessment for Canada Sustainable Technologies Evaluation Program. Toronto: 2015.
- [97] Driesse A, Stein J. From IEC 61853 power measurements to PV system simulations. Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States): 2020. <https://doi.org/10.2172/1615179>.
- [98] International Electrotechnical Commission. Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating - Part 2: Spectral responsivity, incidence angle and module operating temperature measurements, IEC 61853-2. Geneva, Switzerland: 2016.
- [99] International Electrotechnical Commission. Photovoltaic (PV) Module Performance Testing and Energy Rating - Part 3: Energy Rating of PV Modules, IEC 61853-3. Geneva, Switzerland: 2018.
- [100] International Electrotechnical Commission. Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating - Part 4: Standard reference climatic profiles, IEC 61853-4. Geneva, Switzerland: 2018.

- [101] Rodrigo PM, Fernández EF, Almonacid FM, Pérez-Higueras PJ. Quantification of the spectral coupling of atmosphere and photovoltaic system performance: Indexes, methods and impact on energy harvesting. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2017;163:73–90. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.01.018>.
- [102] Paudyal BR, Somasundaram SG, Louwen A, Reinders AHME, van Sark WGJHM, Stellbogen D, et al. Analysis of spectral irradiance variation in northern Europe using average photon energy distributions. *Renew Energy* 2024;224:120057. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120057>.
- [103] Zamalloa-Jara MA, Sevillano-Bendezú MÁ, Ulbrich C, Nofuentes G, Grieseler R, Töfflinger JA. Overirradiance conditions and their impact on the spectral distribution at low- and mid-latitude sites. *Solar Energy* 2023;259:99–106. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.05.010>.
- [104] Sevillano-Bendezú MÁ, Conde LÁ, García MA, Angulo JR, Casa J de la, Ripalda JM, et al. Performance loss rate and benchmarking of c-Si and thin-film PV modules considering thermal and spectral effects at a low-latitude site. *Renew Energy* 2026;257:124732. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.124732>.
- [105] Farias-Basulto GA, Sevillano-Bendezú MÁ, Riedel M, Khenkin M, Töfflinger JA, Schlatmann R, et al. Measurement and analysis of annual solar spectra at different installation angles in central Europe. *Solar Energy* 2023;266:112175. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112175>.
- [106] Sevillano-Bendezú MA, Khenkin M, Nofuentes G, de la Casa J, Ulbrich C, Töfflinger JA. Predictability and interrelations of spectral indicators for PV performance in multiple latitudes and climates. *Solar Energy* 2023;259:174–87. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.04.067>.
- [107] Paudyal BR, Imenes AG. Analysis of spectral irradiance distribution for PV applications at high latitude. 2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), IEEE; 2020, p. 1834–41. <https://doi.org/10.1109/PVSC45281.2020.9300532>.
- [108] Jardine CN, Betts TR, Infield D, Jardine CN, Betts TR, Gottschalg R, et al. Influence of Spectral Effects on the Performance of Multijunction Amorphous Silicon Cells. 2002.
- [109] Minemoto T, Nakada Y, Takahashi H, Takakura H. Uniqueness verification of solar spectrum index of average photon energy for evaluating outdoor performance of photovoltaic modules. *Solar Energy* 2009;83:1294–9. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.03.004>.
- [110] Williams SR, Betts TR, Beyer HG. Modelling long-term module performance based on realistic reporting conditions with consideration to spectral effects 2003. <https://doi.org/10.1109/WCPEC.2003.1306312>.
- [111] Hansen CW, Klise KA, Stein JS. Data requirements for calibration of photovoltaic system models using monitored system data. 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), IEEE; 2015, p. 1–5. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2015.7356173>.
- [112] Nofuentes G, Gueymard CA, Aguilera J, Pérez-Godoy MD, Charte F. Is the average photon energy a unique characteristic of the spectral distribution of global irradiance? *Solar Energy* 2017;149:32–43. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.086>.
- [113] King DL, Boyson WE, Kratochvil JA. Photovoltaic Array Performance Model. Albuquerque, New Mexico: 2003.
- [114] King BH, Hansen CW, Riley D, Robinson CD, Pratt L. SANDIA REPORT Procedure to Determine Coefficients for the Sandia Array Performance Model (SAPM). 2016.
- [115] F. Holmgren W, W. Hansen C, A. Mikofski M. pvlib python: a python package for modeling solar energy systems. *J Open Source Softw* 2018;3:884. <https://doi.org/10.21105/joss.00884>.
- [116] Reitan CH. Surface Dew Point and Water Vapor Aloft. *Journal of Applied Meteorology* 1963;776–9. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1963\)002<0776:SDPAWV>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0450(1963)002<0776:SDPAWV>2.0.CO;2).
- [117] Gueymard C. Analysis of monthly average atmospheric precipitable water and turbidity in Canada and northern United States. vol. 53. 1994.
- [118] Black JN, Bonython CW, Prescott JA. Solar radiation and the duration of sunshine. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 1954;80:231–5. <https://doi.org/10.1002/qj.49708034411>.
- [119] Gueymard CA. A reevaluation of the solar constant based on a 42-year total solar irradiance time series and a reconciliation of spaceborne observations. *Solar Energy* 2018;168:2–9. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.001>.

- [120] Sengupta M, Habte A, Benton B, Xie Y, Buster G, Foster M. Improving the Accuracy and Coverage of the NSRDB. EMS Annual Meeting 2024, Barcelona, Spain: 2024. <https://doi.org/10.5194/ems2024-972>.
- [121] Wei X, Chang N-B, Bai K, Gao W. Satellite remote sensing of aerosol optical depth: advances, challenges, and perspectives. *Crit Rev Environ Sci Technol* 2020;50:1640–725. <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1665944>.
- [122] Ruiz-Arias JA, Gueymard CA. Solar resource for high-concentrator photovoltaic applications. *Green Energy and Technology* 2015;190:261–302. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15039-0_10.
- [123] Li X, Wagner F, Peng W, Yang J, Mauzerall DL. Reduction of solar photovoltaic resources due to air pollution in China. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2017;114:11867–72. <https://doi.org/10.1073/pnas.1711462114>.
- [124] Gómez-Amo JL, Freile-Aranda MD, Camarasa J, Estellés V, Utrillas MP, Martínez-Lozano JA. 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* 2019;235:1226–34. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.052>.
- [125] Dufresne J-L, Gautier C, Ricchiazzi P. Longwave Scattering Effects of Mineral Aerosols. *Journal of Atmospheric Sciences* 2002;1959–66.
- [126] Swinehart DF. The Beer-Lambert Law. *J Chem Educ* 1962;39:333. <https://doi.org/10.1021/ed039p333>.
- [127] Berk A, Conforti P, Kennett R, Perkins T, Hawes F, van den Bosch J. MODTRAN® 6: A major upgrade of the MODTRAN® radiative transfer code. 2014 6th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS), IEEE; 2014, p. 1–4. <https://doi.org/10.1109/WHISPERS.2014.8077573>.
- [128] Myers DR, Gueymard CA. Description and availability of the SMARTS spectral model for photovoltaic applications. *Organic Photovoltaics V*, vol. 5520, SPIE; 2004, p. 56. <https://doi.org/10.1117/12.555943>.
- [129] McClatchey RA. Atmospheric Transmission Models And Measurements. In: Ludwig CB, editor. 23rd Annual Technical Symposium, San Diego, California, USA: 1979, p. 2–6. <https://doi.org/10.1117/12.957922>.
- [130] Myers DR, Emery K, Gueymard C. Revising and Validating Spectral Irradiance Reference Standards for Photovoltaic Performance Evaluation. *J Sol Energy Eng* 2004;126:567–74. <https://doi.org/10.1115/1.1638784>.
- [131] Gueymard CA. Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance. *Solar Energy* 2001;71:325–46. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(01\)00054-8](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(01)00054-8).
- [132] Utrillas MP, Boscá JV, Martínez-Lozano JA, Cañada J, Tena F, Pinazo JM. A comparative study of SPCTRAL2 and SMARTS2 parameterised models based on spectral irradiance measurements at Valencia, Spain. *Solar Energy* 1998;63:161–71. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(98\)00058-9](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(98)00058-9).
- [133] Xie Y, Sengupta M. A Fast All-sky Radiation Model for Solar applications with Narrowband Irradiances on Tilted surfaces (FARMS-NIT): Part I. The clear-sky model. *Solar Energy* 2018;174:691–702. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.09.056>.
- [134] Xie Y, Sengupta M, Wang C. A Fast All-sky Radiation Model for Solar applications with Narrowband Irradiances on Tilted surfaces (FARMS-NIT): Part II. The cloudy-sky model. *Solar Energy* 2019;188:799–812. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.06.058>.
- [135] Sengupta M, Xie Y, Lopez A, Habte A, Maclaurin G, Shelby J. The National Solar Radiation Data Base (NSRDB). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2018;89:51–60. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.003>.
- [136] Sengupta M, Habte A, Xie Y, Buster G, Benton B, Yang J. New Capabilities in the National Solar Radiation Data Base. EMS Annual Meeting 2023, Bratislava, Slovakia: 2023. <https://doi.org/10.5194/ems2023-593>.
- [137] Montagner F. The Role of EUMETSAT (Europe). *Satellites for Atmospheric Sciences 1*, Wiley; 2023, p. 117–39. <https://doi.org/10.1002/9781394264759.ch5>.
- [138] Xie Y, Habte A, Sengupta M, Vignola F. An Evaluation of the Spectral Irradiance Data from the NSRDB. Golden, CO (United States): 2021. <https://doi.org/10.2172/1820103>.

- [139] Daxini R, Anderson KS, Stein JS, Theristis M. Photovoltaic Module Spectral Mismatch Losses Due to Cell-Level EQE Variation. *IEEE J Photovolt* 2025;15:458–64. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2025.3545820>.
- [140] Ukoima KN, Efughu D, Azubuikwe OC, Akpiri BF. Investigating the optimal Photovoltaic (PV) tilt angle using the Photovoltaic Geographic Information System (PVGIS). *Nigerian Journal of Technology* 2024;43:101–14. <https://doi.org/10.4314/njt.v43i1.12>.
- [141] Lave M, Hayes W, Pohl A, Hansen CW. Evaluation of Global Horizontal Irradiance to Plane-of-Array Irradiance Models at Locations Across the United States. *IEEE J Photovolt* 2015;5:597–606. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2015.2392938>.
- [142] Huld T, Friesen G, Skoczek A, Kenny RP, Sample T, Field M, et al. A power-rating model for crystalline silicon PV modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2011;95:3359–69. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.07.026>.
- [143] ITRPV: TOPCon to surpass PERC in coming years. <https://www.pveurope.eu/solar-modules/itrpv-topcon-surpass-perc-coming-years>. s Interneta 2025.
- [144] Gatz S, Müller J, Dullweber T, Brendel R. Analysis and Optimization of the Bulk and Rear Recombination of Screen-Printed PERC Solar Cells. *Energy Procedia* 2012;27:95–102. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.07.035>.
- [145] Tao Y, Rohatgi A. High-Efficiency Front Junction n-Type Crystalline Silicon Solar Cells. *Nanostructured Solar Cells, InTech*; 2017. <https://doi.org/10.5772/65023>.
- [146] Jensen N, Hausner RM, Bergmann RB, Werner JH, Rau U. Optimization and characterization of amorphous/crystalline silicon heterojunction solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 2002;10:1–13. <https://doi.org/10.1002/pip.398>.
- [147] Chen Y, Shen H, Altermatt PP. Analysis of recombination losses in screen-printed aluminum-alloyed back surface fields of silicon solar cells by numerical device simulation. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2014;120:356–62. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.05.051>.
- [148] Saeedi A, Karimi M, Mohammadpour H. Increasing the Efficiency of the Cadmium Telluride Solar Cell by Increasing the Number of Absorber Layers and Optimizing Its Efficiency. *Advances in Condensed Matter Physics* 2024;2024. <https://doi.org/10.1155/acmp/6012066>.
- [149] Matsui T, Bidiville A, Maejima K, Sai H, Koida T, Suezaki T, et al. High-efficiency amorphous silicon solar cells: Impact of deposition rate on metastability. *Appl Phys Lett* 2015;106. <https://doi.org/10.1063/1.4907001>.
- [150] Werner J, Barraud L, Walter A, Bräuninger M, Sahli F, Sacchetto D, et al. Efficient Near-Infrared-Transparent Perovskite Solar Cells Enabling Direct Comparison of 4-Terminal and Monolithic Perovskite/Silicon Tandem Cells. *ACS Energy Lett* 2016;1:474–80. <https://doi.org/10.1021/acseenergylett.6b00254>.
- [151] Lee S, Price KJ. Spectral Responses in Quantum Efficiency of Emerging Kesterite Thin-Film Solar Cells. *Optoelectronics - Advanced Device Structures, InTech*; 2017. <https://doi.org/10.5772/68058>.
- [152] Cui D, Liang S, Wang D, Liu Z. A 1 km global dataset of historical (1979–2013) and future (2020–2100) Köppen–Geiger climate classification and bioclimatic variables. *Earth Syst Sci Data* 2021;13:5087–114. <https://doi.org/10.5194/essd-13-5087-2021>.
- [153] Lloyd S. Least squares quantization in PCM. *IEEE Trans Inf Theory* 1982;28:129–37. <https://doi.org/10.1109/TIT.1982.1056489>.
- [154] Arbelaiz O, Gurrutxaga I, Muguerza J, Pérez JM, Perona I. An extensive comparative study of cluster validity indices. *Pattern Recognit* 2013;46:243–56. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2012.07.021>.
- [155] US climate data. <https://www.usclimatedata.com/climate/golden/colorado/united-states/usco0553>. s Interneta 2025.
- [156] Martínez-Valderrama J, Guirado E, Maestre F. Unraveling Misunderstandings about Desertification: The Paradoxical Case of the Tabernas-Sorbas Basin in Southeast Spain. *Land (Basel)* 2020;9:269. <https://doi.org/10.3390/land9080269>.
- [157] Plataforma Solar de Almería. <https://www.psa.es/en/>. s Interneta 2025.
- [158] The World Meteorological Organisation. <https://community.wmo.int/site/knowledge-hub/programmes-and-initiatives/instruments-and-methods-of-observation-programme>

- imop/measurement-lead-centres/wmo-measurement-lead-centre-lindenberg-germany. s Interneta 2025.
- [159] Deutscher Wetterdienst. https://www.dwd.de/EN/Home/home_node.html. s Interneta 2025.
- [160] Martin N, Ruiz JM. A New Method for the Spectral Characterisation of PV Modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 1999;7:299–310. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-159X\(199907/08\)7:43.3.CO;2-S](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-159X(199907/08)7:43.3.CO;2-S).
- [161] Nofuentes G, García-Domingo B, Muñoz J V., Chenlo F. Analysis of the dependence of the spectral factor of some PV technologies on the solar spectrum distribution. *Appl Energy* 2014;113:302–9. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.044>.
- [162] Nofuentes G, de la Casa J, Solís-Alemán EM, Fernández EF. Spectral impact on PV performance in mid-latitude sunny inland sites: Experimental vs. modelled results. *Energy* 2017;141:1857–68. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.078>.
- [163] Goloub P, Li Z, Dubovik O, Blarel L, Podvin T, Jankowiak I, et al. AERONET sunphotometer network overview: description, activities, results. In: Matvienko GG, Banakh VA, editors., 2007, p. 69360V-69360V – 15. <https://doi.org/10.1117/12.783171>.
- [164] Dubovik O, Smirnov A, Holben BN, King MD, Kaufman YJ, Eck TF, et al. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 2000;105:9791–806. <https://doi.org/10.1029/2000JD900040>.
- [165] Long CN, Shi Y. An Automated Quality Assessment and Control Algorithm for Surface Radiation Measurements. *The Open Atmospheric Science Journal* 2008;2:23–37. <https://doi.org/10.2174/1874282300802010023>.
- [166] Ibrahim IA, Mohamed A, Khatib T. Modeling of photovoltaic array using random forests technique. 2015 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON), IEEE; 2015, p. 390–3. <https://doi.org/10.1109/CENCON.2015.7409575>.
- [167] Kayri M, Kayri I, Gencoglu MT. The performance comparison of Multiple Linear Regression, Random Forest and Artificial Neural Network by using photovoltaic and atmospheric data. 2017 14th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES), IEEE; 2017, p. 1–4. <https://doi.org/10.1109/EMES.2017.7980368>.
- [168] Chahboun S, Maaroufi M. Performance Comparison of Support Vector Regression, Random Forest and Multiple Linear Regression to Forecast the Power of Photovoltaic Panels. 2021 9th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), IEEE; 2021, p. 1–4. <https://doi.org/10.1109/IRSEC53969.2021.9741154>.
- [169] Huertas Tato J, Centeno Brito M. Using Smart Persistence and Random Forests to Predict Photovoltaic Energy Production. *Energies (Basel)* 2018;12:100. <https://doi.org/10.3390/en12010100>.
- [170] David A, Sint S, Bednar T. Data-Driven Approach Utilising Random Forest Regression for PV Performance Monitoring. *Proceedings of EuroSun 2022 - ISES and IEA SHC International Conference on Solar Energy for Buildings and Industry, Freiburg, Germany: International Solar Energy Society*; 2022, p. 1–11. <https://doi.org/10.18086/eurosun.2022.16.03>.
- [171] Breiman L. Random Forests. *Mach Learn* 2001;45:5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
- [172] Nembrini S, König IR, Wright MN. The revival of the Gini importance? *Bioinformatics* 2018;34:3711–8. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bty373>.
- [173] Menze BH, Kelm BM, Masuch R, Himmelreich U, Bachert P, Petrich W, et al. A comparison of random forest and its Gini importance with standard chemometric methods for the feature selection and classification of spectral data. *BMC Bioinformatics* 2009;10:213. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-10-213>.
- [174] Državni hidrometeorološki zavod. https://meteo.hr/klima.php?section=klima_podaci¶m=k1&Grad=split_marjan. s Interneta 2025.

PRILOG A

Tablica A.1 Popis svih analiziranih lokacija

Lokacija	Geografska širina	Geografska dužina	Nadm. visina [m]	Optimalan kut (PVGIS)	KCC
Amsterdam	52,371	4,9	6	39	Cfb
Athens	37,984	23,728	88	33	Csa
Barcelona	41,383	2,174	23	38	Csa
Bergen	60,394	5,326	7	43	Cfb
Berlin	52,517	13,189	44	40	Dfb
Bern	46,949	7,461	544	39	Dfb
Bilbao	43,262	-2,935	31	37	Cfb
Birmingham	52,477	-1,894	116	40	Cfb
Brasov	45,652	25,611	575	38	Dfb
Bratislava	48,152	17,109	157	38	Dfb
Brno	49,192	16,611	216	38	Dfb
Bruxelles	50,839	4,375	83	39	Cfb
Bucharest	44,436	26,103	83	36	Dfb
Budapest	47,498	19,041	109	39	Dfb
Burgas	42,499	27,469	17	34	Cfa
Cologne	50,938	6,96	54	39	Cfb
Constanta	44,173	28,634	45	36	Cfb
Copenhagen	55,687	12,57	12	42	Cfb
Cork	51,899	-8,471	10	39	Cfb
Debrecen	47,531	21,626	123	38	Dfb
Dublin	53,35	-6,26	13	42	Cfb
Eindhoven	51,439	5,479	24	39	Cfb
Esbjerg	55,466	8,454	16	41	Cfb
Gothenburg	57,707	11,967	11	43	Dfb
Graz	47,071	15,438	364	40	Dfb
Hamburg	53,55	9,999	20	40	Dfb
Helsinki	60,167	24,943	14	44	Dfb
Iasi	47,159	27,584	46	37	Dfb
Katerini	40,271	22,509	38	34	BSk
Kavala	40,937	24,412	3	35	Csa
Koper	45,548	13,73	16	39	Cfa
Krakov	50,062	19,937	218	39	Dfb
Kranj	46,24	14,355	388	37	Dfb
Limassol	34,686	33,042	24	31	Csa
Lisbon	38,71	-9,137	20	33	Csa
London	51,507	-0,128	19	40	Cfb
Luxembourg	49,611	6,133	303	37	Cfb
Ljubljana	46,05	14,507	312	35	Dfb

Madrid	40,413	-3,691	644	37	Csa
Manchester	53,479	-2,246	53	39	Cfb
Marseille	43,296	5,37	0	39	Csa
Milano	45,467	9,19	145	39	Cfa
Munchen	48,137	11,575	524	39	Dfb
Nantes	47,217	-1,553	19	38	Cfb
Naples	40,836	14,249	29	35	Csa
Nicosia	35,179	33,375	138	32	BSh
Nitra	48,313	18,09	141	39	Cfb
Osijek	45,555	18,695	88	37	Dfb
Oslo	59,913	10,739	26	45	Dfb
Palermo	38,111	13,352	39	34	Csa
Paris	48,857	2,352	32	40	Cfb
Plovdiv	42,142	24,755	167	36	Cfa
Plymouth	50,371	-4,143	17	39	Cfb
Porto	41,149	-8,61	85	36	Csb
Prague	50,06	14,447	234	39	Dfb
Riga	56,949	24,105	15	42	Dfb
Rijeka	45,327	14,441	2	38	Cfa
Roma	41,893	12,483	42	35	Csa
Seville	37,389	-5,955	17	35	Csa
Sofia	42,692	23,325	558	36	Dfb
Split	43,512	16,44	16	38	Csa
Stockholm	59,325	18,071	26	44	Dfb
Strasbourg	48,584	7,751	151	38	Cfb
Stuttgart	48,778	9,18	248	39	Cfb
Szeged	46,255	20,149	84	38	Dfb
Talinn	59,437	24,749	20	43	Dfb
Thira	36,42	25,432	223	31	BSh
Thessaloniki	40,64	22,935	14	35	BSk
Toulouse	43,602	1,444	156	37	Cfb
Udine	46,064	13,236	118	40	Cfa
Valencia	39,468	-0,368	22	37	BSk
Valletta	35,898	14,515	49	32	Csa
Varna	43,215	27,908	57	35	Cfa
Vienna	48,208	16,372	193	39	Dfb
Vilnius	54,687	25,283	100	40	Dfb
Warsav	52,232	21,007	121	39	Dfb
Wroclav	51,109	17,033	125	40	Dfb
Zagreb	45,813	15,977	141	37	Dfb
Zurich	47,368	8,541	414	38	Cfb

Tablica A.2 Usporedba prosječnog europskog spektra i AM 1,5 spektra

Područje	Raspon valnih duljina	Ukupno ozračenje [W/m ²]	Ukupno referentno ozračenje [W/m ²]	Ukupna razlika (%)
UV	280-400 nm	52,73	46,10	14,38
VIDLJIVO	400-700 nm	451,94	429,24	5,28
NIR	700-2500 nm	488,21	515,	-5,38
SWIR	2500-4000 nm	5,93	7,789045771	-23,83
UKUPNO	280-4000 nm	1000	1000	0

Tablica A.3 Godišnje vrijednosti SF faktora za sve lokacije

Lokacija	Režim	a-Si	CdTe	PERC	Pvskt	HJT	poli-Si	PERT	CZTS SE
Amsterdam	Svi uvjeti	1,0615	1,0352	1,0184	1,0451	1,0148	1,0208	1,0180	1,0094
Amsterdam	Vedro	0,9943	1,0005	1,0024	0,9962	1,0044	1,0017	1,0021	1,0035
Athens	Svi uvjeti	1,0578	1,0260	1,0060	1,0376	1,0020	1,0086	1,0057	0,9977
Athens	Vedro	1,0378	1,0147	0,9993	1,0222	0,9969	1,0010	0,9989	0,9941
Barcelona	Svi uvjeti	1,0623	1,0327	1,0125	1,0436	1,0087	1,0151	1,0120	1,0040
Barcelona	Vedro	1,0277	1,0131	1,0015	1,0174	1,0003	1,0027	1,0011	0,9977
Bergen	Svi uvjeti	1,0344	1,0245	1,0175	1,0276	1,0165	1,0184	1,0172	1,0123
Bergen	Vedro	0,9807	0,9955	1,0028	0,9879	1,0060	1,0014	1,0027	1,0057
Berlin	Svi uvjeti	1,0477	1,0280	1,0144	1,0349	1,0120	1,0162	1,0141	1,0076
Berlin	Vedro	1,0000	1,0033	1,0027	1,0002	1,0042	1,0023	1,0023	1,0031
Bern	Svi uvjeti	1,0529	1,0246	1,0101	1,0355	1,0062	1,0121	1,0100	1,0015
Bern	Vedro	1,0159	1,0034	0,9979	1,0070	0,9970	0,9984	0,9978	0,9950
Bilbao	Svi uvjeti	1,0640	1,0317	1,0128	1,0440	1,0084	1,0155	1,0126	1,0031
Bilbao	Vedro	1,0261	1,0092	0,9993	1,0144	0,9978	1,0004	0,9990	0,9953
Birmingham	Svi uvjeti	1,0542	1,0353	1,0223	1,0425	1,0195	1,0242	1,0220	1,0141
Birmingham	Vedro	0,9782	0,9984	1,0061	0,9887	1,0100	1,0046	1,0058	1,0096
Brasov	Svi uvjeti	1,0565	1,0271	1,0109	1,0384	1,0068	1,0132	1,0108	1,0020
Brasov	Vedro	1,0195	1,0069	0,9991	1,0103	0,9984	0,9999	0,9989	0,9964
Bratislava	Svi uvjeti	1,0556	1,0283	1,0116	1,0385	1,0080	1,0138	1,0113	1,0034
Bratislava	Vedro	1,0198	1,0081	1,0001	1,0111	0,9994	1,0008	0,9998	0,9974
Brno	Svi uvjeti	1,0631	1,0334	1,0148	1,0446	1,0107	1,0173	1,0145	1,0054
Brno	Vedro	1,0113	1,0057	1,0010	1,0062	1,0013	1,0013	1,0007	0,9996
Bruxelles	Svi uvjeti	1,0664	1,0353	1,0169	1,0474	1,0124	1,0195	1,0166	1,0067
Bruxelles	Vedro	1,0053	1,0039	1,0018	1,0028	1,0026	1,0018	1,0015	1,0010
Bucharest	Svi uvjeti	1,0574	1,0294	1,0105	1,0395	1,0070	1,0130	1,0101	1,0026
Bucharest	Vedro	1,0253	1,0124	1,0015	1,0155	1,0008	1,0025	1,0010	0,9988
Budapest	Svi uvjeti	1,0539	1,0297	1,0127	1,0383	1,0097	1,0149	1,0122	1,0053
Budapest	Vedro	1,0124	1,0081	1,0024	1,0077	1,0031	1,0027	1,0020	1,0016
Burgas	Svi uvjeti	1,0616	1,0309	1,0103	1,0420	1,0063	1,0129	1,0098	1,0018
Burgas	Vedro	1,0343	1,0155	1,0009	1,0211	0,9992	1,0025	1,0004	0,9967
Cologne	Svi uvjeti	1,0628	1,0341	1,0165	1,0449	1,0125	1,0190	1,0162	1,0071

Cologne	Vedro	1,0030	1,0021	1,0008	1,0006	1,0018	1,0006	1,0006	1,0005
Constanta	Svi uvjeti	1,0647	1,0319	1,0112	1,0442	1,0068	1,0139	1,0108	1,0018
Constanta	Vedro	1,0318	1,0133	1,0002	1,0191	0,9985	1,0016	0,9998	0,9958
Copenhagen	Svi uvjeti	1,0607	1,0338	1,0173	1,0439	1,0137	1,0197	1,0170	1,0083
Copenhagen	Vedro	0,9929	0,9963	0,9994	0,9936	1,0009	0,9987	0,9995	0,9996
Cork	Svi uvjeti	1,0529	1,0328	1,0184	1,0400	1,0158	1,0204	1,0180	1,0109
Cork	Vedro	0,9942	1,0052	1,0072	0,9992	1,0097	1,0065	1,0067	1,0082
Debrecen	Svi uvjeti	1,0560	1,0301	1,0120	1,0393	1,0088	1,0143	1,0115	1,0044
Debrecen	Vedro	1,0198	1,0108	1,0020	1,0122	1,0020	1,0027	1,0014	1,0002
Dublin	Svi uvjeti	1,0742	1,0453	1,0260	1,0567	1,0216	1,0288	1,0256	1,0149
Dublin	Vedro	0,9879	1,0046	1,0084	0,9963	1,0117	1,0074	1,0080	1,0106
Eindhoven	Svi uvjeti	1,0576	1,0328	1,0168	1,0420	1,0134	1,0190	1,0164	1,0084
Eindhoven	Vedro	0,9990	1,0026	1,0026	0,9992	1,0043	1,0021	1,0022	1,0032
Esbjerg	Svi uvjeti	1,0444	1,0267	1,0155	1,0330	1,0132	1,0170	1,0152	1,0088
Esbjerg	Vedro	0,9905	0,9967	1,0003	0,9926	1,0022	0,9995	1,0002	1,0014
Gothenburg	Svi uvjeti	1,0360	1,0232	1,0147	1,0276	1,0132	1,0159	1,0145	1,0091
Gothenburg	Vedro	0,9825	0,9947	1,0017	0,9884	1,0044	1,0004	1,0017	1,0038
Graz	Svi uvjeti	1,0601	1,0321	1,0146	1,0426	1,0108	1,0170	1,0143	1,0057
Graz	Vedro	1,0135	1,0064	1,0010	1,0075	1,0011	1,0014	1,0007	0,9993
Hamburg	Svi uvjeti	1,0546	1,0333	1,0184	1,0409	1,0157	1,0204	1,0179	1,0107
Hamburg	Vedro	0,9892	0,9994	1,0029	0,9933	1,0056	1,0019	1,0025	1,0050
Helsinki	Svi uvjeti	1,0385	1,0223	1,0124	1,0273	1,0110	1,0137	1,0121	1,0075
Helsinki	Vedro	1,0043	1,0013	0,9996	1,0003	1,0005	0,9994	0,9993	0,9996
Iasi	Svi uvjeti	1,0559	1,0293	1,0113	1,0388	1,0079	1,0136	1,0108	1,0033
Iasi	Vedro	1,0236	1,0117	1,0015	1,0144	1,0010	1,0025	1,0011	0,9990
Katerini	Svi uvjeti	1,0539	1,0259	1,0069	1,0357	1,0035	1,0092	1,0064	0,9996
Katerini	Vedro	1,0344	1,0151	1,0005	1,0208	0,9988	1,0020	1,0000	0,9964
Kavala	Svi uvjeti	1,0575	1,0291	1,0085	1,0388	1,0052	1,0110	1,0079	1,0012
Kavala	Vedro	1,0365	1,0173	1,0013	1,0227	0,9998	1,0030	1,0006	0,9975
Koper	Svi uvjeti	1,0551	1,0300	1,0116	1,0387	1,0086	1,0139	1,0110	1,0044
Koper	Vedro	1,0247	1,0134	1,0027	1,0158	1,0023	1,0037	1,0021	1,0002
Krakow	Svi uvjeti	1,0583	1,0324	1,0147	1,0418	1,0113	1,0170	1,0142	1,0064
Krakow	Vedro	1,0122	1,0082	1,0025	1,0077	1,0032	1,0028	1,0020	1,0016
Kranj	Svi uvjeti	1,0564	1,0285	1,0118	1,0390	1,0081	1,0141	1,0116	1,0033
Kranj	Vedro	1,0192	1,0070	0,9996	1,0102	0,9989	1,0003	0,9993	0,9969
Limassol	Svi uvjeti	1,0639	1,0300	1,0082	1,0427	1,0036	1,0110	1,0078	0,9990
Limassol	Vedro	1,0326	1,0144	1,0007	1,0198	0,9991	1,0021	1,0002	0,9966
Lisbon	Svi uvjeti	1,0567	1,0242	1,0066	1,0366	1,0022	1,0090	1,0065	0,9975
Lisbon	Vedro	1,0322	1,0088	0,9972	1,0171	0,9945	0,9987	0,9972	0,9914
Ljubljana	Svi uvjeti	1,0599	1,0304	1,0121	1,0415	1,0081	1,0146	1,0118	1,0032
Ljubljana	Vedro	1,0220	1,0087	0,9999	1,0123	0,9990	1,0008	0,9996	0,9969
London	Svi uvjeti	1,0568	1,0350	1,0203	1,0432	1,0172	1,0224	1,0199	1,0119
London	Vedro	0,9846	0,9997	1,0049	0,9918	1,0082	1,0037	1,0046	1,0077
Luxembourg	Svi uvjeti	1,0543	1,0273	1,0126	1,0376	1,0088	1,0147	1,0124	1,0040
Luxembourg	Vedro	1,0090	1,0020	0,9991	1,0033	0,9990	0,9992	0,9990	0,9974

Madrid	Svi uvjeti	1,0380	1,0107	1,0004	1,0212	0,9968	1,0019	1,0006	0,9932
Madrid	Vedro	1,0201	0,9995	0,9936	1,0069	0,9913	0,9944	0,9938	0,9889
Manchester	Svi uvjeti	1,0605	1,0396	1,0250	1,0479	1,0217	1,0272	1,0247	1,0157
Manchester	Vedro	0,9742	0,9966	1,0060	0,9862	1,0101	1,0043	1,0058	1,0097
Marseille	Svi uvjeti	1,0549	1,0277	1,0098	1,0374	1,0064	1,0121	1,0094	1,0022
Marseille	Vedro	1,0304	1,0126	1,0002	1,0181	0,9986	1,0015	0,9998	0,9960
Milano	Svi uvjeti	1,0461	1,0245	1,0091	1,0317	1,0067	1,0110	1,0087	1,0031
Milano	Vedro	1,0190	1,0097	1,0014	1,0114	1,0012	1,0021	1,0009	0,9995
Munchen	Svi uvjeti	1,0635	1,0318	1,0140	1,0442	1,0094	1,0166	1,0139	1,0039
Munchen	Vedro	1,0190	1,0061	0,9991	1,0099	0,9981	0,9998	0,9989	0,9959
Nantes	Svi uvjeti	1,0587	1,0316	1,0141	1,0416	1,0105	1,0165	1,0137	1,0057
Nantes	Vedro	1,0192	1,0098	1,0019	1,0118	1,0016	1,0026	1,0015	0,9995
Naples	Svi uvjeti	1,0683	1,0343	1,0115	1,0470	1,0069	1,0145	1,0110	1,0018
Naples	Vedro	1,0352	1,0166	1,0017	1,0224	1,0000	1,0033	1,0012	0,9971
Nicosia	Svi uvjeti	1,0530	1,0238	1,0044	1,0343	1,0008	1,0068	1,0040	0,9969
Nicosia	Vedro	1,0371	1,0153	0,9997	1,0223	0,9975	1,0015	0,9993	0,9948
Nitra	Svi uvjeti	1,0524	1,0280	1,0120	1,0368	1,0089	1,0141	1,0116	1,0045
Nitra	Vedro	1,0144	1,0077	1,0015	1,0084	1,0017	1,0019	1,0011	1,0000
Osijek	Svi uvjeti	1,0548	1,0280	1,0099	1,0376	1,0066	1,0122	1,0094	1,0022
Osijek	Vedro	1,0277	1,0128	1,0011	1,0168	1,0001	1,0023	1,0006	0,9978
Oslo	Svi uvjeti	1,0364	1,0242	1,0171	1,0289	1,0153	1,0182	1,0170	1,0107
Oslo	Vedro	0,9829	0,9948	1,0020	0,9889	1,0045	1,0007	1,0020	1,0036
Palermo	Svi uvjeti	1,0615	1,0298	1,0082	1,0413	1,0041	1,0109	1,0077	0,9997
Palermo	Vedro	1,0405	1,0178	1,0009	1,0251	0,9986	1,0028	1,0004	0,9956
Paris	Svi uvjeti	1,0706	1,0382	1,0184	1,0509	1,0137	1,0213	1,0181	1,0076
Paris	Vedro	1,0063	1,0037	1,0011	1,0034	1,0016	1,0011	1,0009	0,9998
Plovdiv	Svi uvjeti	1,0511	1,0245	1,0071	1,0338	1,0039	1,0093	1,0067	1,0001
Plovdiv	Vedro	1,0283	1,0123	1,0002	1,0167	0,9991	1,0015	0,9998	0,9970
Plymouth	Svi uvjeti	1,0701	1,0383	1,0189	1,0506	1,0143	1,0217	1,0186	1,0083
Plymouth	Vedro	1,0150	1,0074	1,0017	1,0089	1,0015	1,0021	1,0014	0,9993
Porto	Svi uvjeti	1,0617	1,0286	1,0102	1,0413	1,0055	1,0127	1,0100	1,0005
Porto	Vedro	1,0337	1,0090	0,9969	1,0181	0,9939	0,9985	0,9969	0,9906
Prague	Svi uvjeti	1,0630	1,0326	1,0140	1,0441	1,0098	1,0166	1,0137	1,0045
Prague	Vedro	1,0158	1,0064	1,0002	1,0085	0,9999	1,0007	0,9999	0,9979
Riga	Svi uvjeti	1,0437	1,0254	1,0139	1,0318	1,0117	1,0155	1,0136	1,0074
Riga	Vedro	0,9961	0,9988	1,0003	0,9959	1,0018	0,9997	1,0001	1,0009
Rijeka	Svi uvjeti	1,0566	1,0297	1,0109	1,0392	1,0076	1,0133	1,0104	1,0032
Rijeka	Vedro	1,0280	1,0132	1,0013	1,0171	1,0004	1,0025	1,0008	0,9981
Roma	Svi uvjeti	1,0547	1,0271	1,0086	1,0370	1,0051	1,0109	1,0081	1,0009
Roma	Vedro	1,0290	1,0132	1,0013	1,0177	1,0001	1,0026	1,0009	0,9976
Seville	Svi uvjeti	1,0463	1,0171	1,0018	1,0279	0,9980	1,0039	1,0017	0,9941
Seville	Vedro	1,0341	1,0091	0,9968	1,0180	0,9939	0,9984	0,9968	0,9908
Sofia	Svi uvjeti	1,0579	1,0258	1,0084	1,0382	1,0039	1,0108	1,0083	0,9992
Sofia	Vedro	1,0244	1,0076	0,9980	1,0128	0,9965	0,9990	0,9978	0,9943
Split	Svi uvjeti	1,0477	1,0262	1,0095	1,0331	1,0073	1,0115	1,0089	1,0038

Split	Vedro	1,0268	1,0142	1,0024	1,0170	1,0018	1,0035	1,0017	0,9998
Stockholm	Svi uvjeti	1,0320	1,0222	1,0152	1,0254	1,0141	1,0161	1,0149	1,0101
Stockholm	Vedro	0,9794	0,9946	1,0024	0,9872	1,0055	1,0009	1,0023	1,0049
Strasbourg	Svi uvjeti	1,0615	1,0308	1,0124	1,0423	1,0082	1,0149	1,0121	1,0033
Strasbourg	Vedro	1,0192	1,0068	0,9994	1,0100	0,9987	1,0001	0,9991	0,9967
Stuttgart	Svi uvjeti	1,0572	1,0292	1,0128	1,0397	1,0090	1,0150	1,0125	1,0041
Stuttgart	Vedro	1,0129	1,0046	0,9996	1,0062	0,9995	1,0000	0,9994	0,9978
Szeged	Svi uvjeti	1,0546	1,0286	1,0105	1,0377	1,0074	1,0128	1,0101	1,0031
Szeged	Vedro	1,0237	1,0118	1,0015	1,0144	1,0010	1,0025	1,0010	0,9991
Talinn	Svi uvjeti	1,0505	1,0280	1,0144	1,0358	1,0117	1,0162	1,0140	1,0073
Talinn	Vedro	1,0093	1,0018	0,9984	1,0031	0,9985	0,9986	0,9983	0,9969
Thessaloniki	Svi uvjeti	1,0568	1,0272	1,0074	1,0377	1,0037	1,0099	1,0070	0,9996
Thessaloniki	Vedro	1,0333	1,0144	1,0003	1,0200	0,9987	1,0018	0,9998	0,9963
Thira	Svi uvjeti	1,0546	1,0254	1,0059	1,0358	1,0024	1,0084	1,0055	0,9986
Thira	Vedro	1,0370	1,0149	0,9993	1,0220	0,9971	1,0010	0,9989	0,9945
Toulouse	Svi uvjeti	1,0548	1,0266	1,0094	1,0371	1,0057	1,0117	1,0092	1,0012
Toulouse	Vedro	1,0253	1,0098	0,9999	1,0144	0,9986	1,0010	0,9997	0,9962
Udine	Svi uvjeti	1,0519	1,0278	1,0113	1,0363	1,0084	1,0134	1,0109	1,0042
Udine	Vedro	1,0157	1,0083	1,0016	1,0092	1,0018	1,0021	1,0012	1,0001
Valencia	Svi uvjeti	1,0564	1,0265	1,0078	1,0375	1,0039	1,0103	1,0075	0,9996
Valencia	Vedro	1,0312	1,0117	0,9995	1,0181	0,9976	1,0009	0,9993	0,9948
Valletta	Svi uvjeti	1,0583	1,0274	1,0067	1,0386	1,0028	1,0093	1,0062	0,9985
Valletta	Vedro	1,0379	1,0159	1,0001	1,0230	0,9979	1,0019	0,9997	0,9951
Varna	Svi uvjeti	1,0585	1,0296	1,0104	1,0400	1,0067	1,0129	1,0100	1,0023
Varna	Vedro	1,0277	1,0132	1,0015	1,0170	1,0006	1,0027	1,0010	0,9983
Vienna	Svi uvjeti	1,0699	1,0367	1,0156	1,0494	1,0109	1,0185	1,0152	1,0054
Vienna	Vedro	1,0186	1,0082	1,0005	1,0108	0,9999	1,0012	1,0002	0,9978
Vilnius	Svi uvjeti	1,0468	1,0256	1,0125	1,0333	1,0098	1,0143	1,0123	1,0054
Vilnius	Vedro	1,0024	1,0009	0,9999	0,9997	1,0008	0,9997	0,9997	0,9996
Warsav	Svi uvjeti	1,0565	1,0318	1,0149	1,0407	1,0117	1,0171	1,0144	1,0068
Warsav	Vedro	1,0050	1,0054	1,0023	1,0032	1,0037	1,0022	1,0019	1,0024
Wroclav	Svi uvjeti	1,0528	1,0297	1,0138	1,0380	1,0109	1,0159	1,0134	1,0064
Wroclav	Vedro	1,0091	1,0067	1,0022	1,0057	1,0031	1,0024	1,0018	1,0016
Zagreb	Svi uvjeti	1,0619	1,0325	1,0126	1,0433	1,0088	1,0152	1,0121	1,0039
Zagreb	Vedro	1,0259	1,0123	1,0014	1,0158	1,0006	1,0025	1,0009	0,9984
Zurich	Svi uvjeti	1,0623	1,0311	1,0126	1,0430	1,0083	1,0151	1,0124	1,0032
Zurich	Vedro	1,0240	1,0087	0,9992	1,0133	0,9980	1,0002	0,9990	0,9957

Tablica A.4 Godišnja vrijednost APE za osam analiziranih lokacija za tri promatrane godine

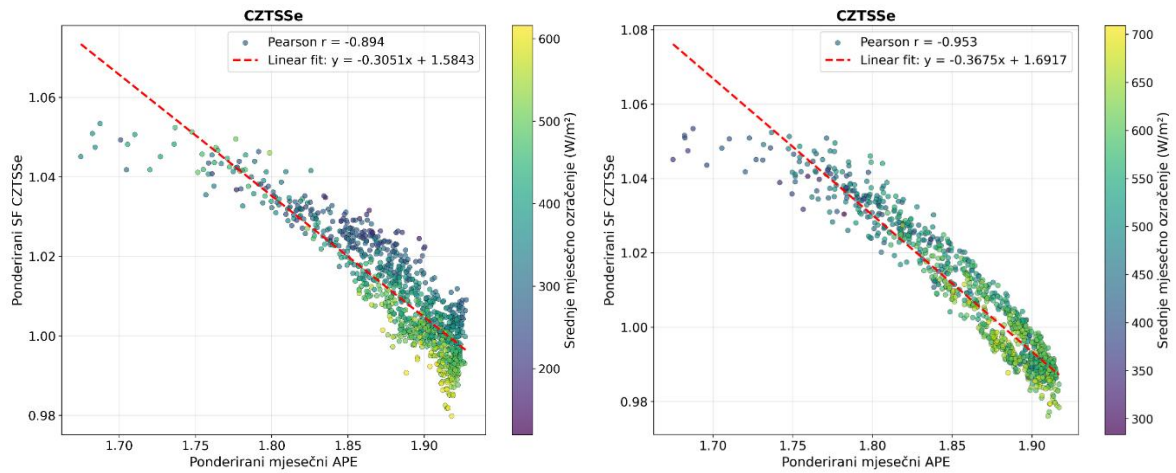
Lokacija	Godina	Godišnji APE - vedro nebo	Godišnji APE - svi uvjeti neba
Nicosia	2017	1,8953	1,9013
Nicosia	2018	1,8967	1,9038
Nicosia	2019	1,8953	1,9025
Barcelona	2017	1,8935	1,9031
Barcelona	2018	1,8914	1,9078
Barcelona	2019	1,8891	1,9032
Madrid	2017	1,8909	1,8974
Madrid	2018	1,8947	1,9032
Madrid	2019	1,8928	1,8994
Rijeka	2017	1,8903	1,8997
Rijeka	2018	1,8899	1,9030
Rijeka	2019	1,8887	1,9004
Amsterdam	2017	1,8652	1,9026
Amsterdam	2018	1,8773	1,8988
Amsterdam	2019	1,8698	1,9002
Wroclav	2017	1,8765	1,9004
Wroclav	2018	1,8789	1,8966
Wroclav	2019	1,8777	1,8972
Vilnius	2017	1,8721	1,8990
Vilnius	2018	1,8736	1,8945
Vilnius	2019	1,8760	1,8951
Bergen	2017	1,8554	1,8837
Bergen	2018	1,8609	1,8805
Bergen	2019	1,8620	1,8850

Tablica A.5 Promjene vrijednosti APE unutar godina - vedro nebo

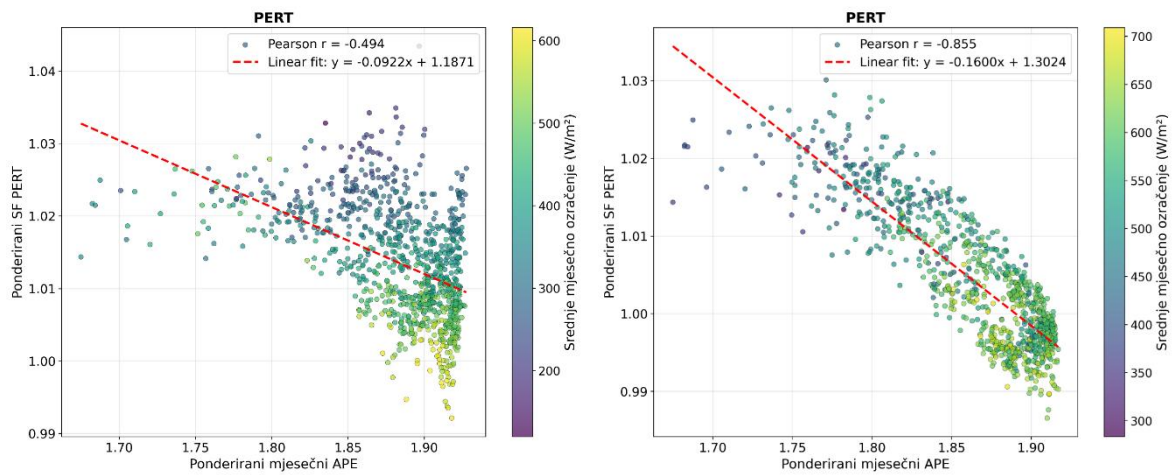
Lokacija	Godina	Prosjek	σ	Min.	Maks.	Raspon	CV
Nicosia	2017	1,8892	0,0218	1,8574	1,9179	0,0605	1,1525
Nicosia	2018	1,8894	0,0218	1,8583	1,9185	0,0602	1,1561
Nicosia	2019	1,8880	0,0239	1,8474	1,9181	0,0707	1,2656
Barcelona	2017	1,8698	0,0466	1,7863	1,9156	0,1292	2,4944
Barcelona	2018	1,8735	0,0427	1,7945	1,9150	0,1205	2,2793
Barcelona	2019	1,8707	0,0426	1,7974	1,9126	0,1151	2,2767
Madrid	2017	1,8844	0,0275	1,8373	1,9166	0,0792	1,4602
Madrid	2018	1,8856	0,0276	1,8390	1,9178	0,0787	1,4623
Madrid	2019	1,8853	0,0269	1,8413	1,9138	0,0725	1,4243
Rijeka	2017	1,8712	0,0395	1,8031	1,9164	0,1133	2,1096
Rijeka	2018	1,8725	0,0358	1,8176	1,9136	0,0960	1,9145
Rijeka	2019	1,8717	0,0385	1,8025	1,9132	0,1107	2,0576
Amsterdam	2017	1,8492	0,0519	1,7728	1,9061	0,1333	2,8060
Amsterdam	2018	1,8503	0,0533	1,7581	1,9059	0,1478	2,8790
Amsterdam	2019	1,8492	0,0502	1,7710	1,9073	0,1363	2,7131
Wroclav	2017	1,8546	0,0491	1,7704	1,9066	0,1362	2,6488
Wroclav	2018	1,8518	0,0538	1,7610	1,9066	0,1456	2,9045
Wroclav	2019	1,8574	0,0466	1,7761	1,9088	0,1327	2,5068
Vilnius	2017	1,8390	0,0615	1,7576	1,9054	0,1478	3,3421
Vilnius	2018	1,8464	0,0606	1,7522	1,9058	0,1536	3,2839
Vilnius	2019	1,8449	0,0587	1,7495	1,9060	0,1565	3,1794
Bergen	2017	1,8236	0,0742	1,6762	1,8968	0,2206	4,0692
Bergen	2018	1,8202	0,0782	1,6801	1,8956	0,2154	4,2945
Bergen	2019	1,8238	0,0726	1,6824	1,8970	0,2146	3,9822

Tablica A.6 Promjene vrijednosti APE unutar godina - svi uvjeti neba

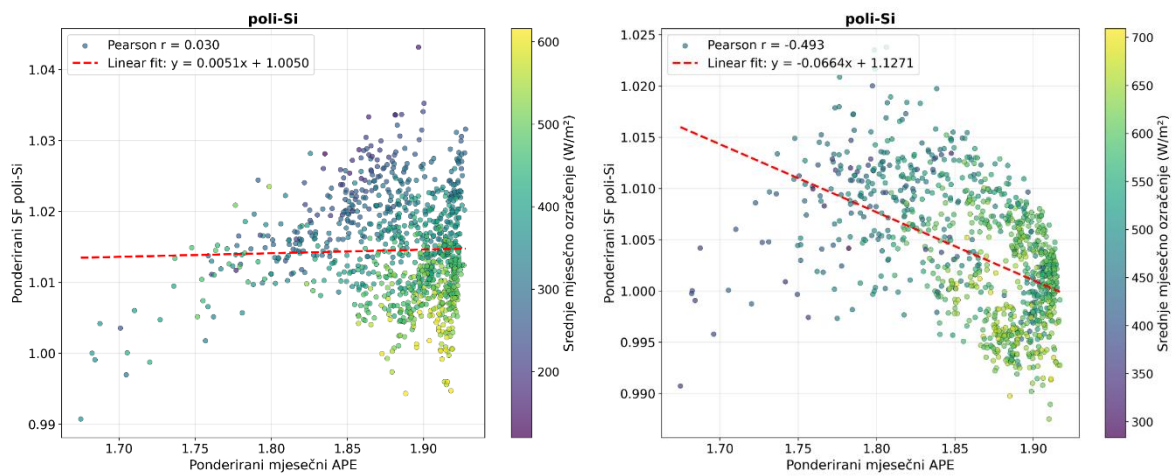
Lokacija	Godina	Prosjek	σ	Min.	Maks.	Raspon	CV
Nicosia	2017	1,8972	0,0179	1,8692	1,9200	0,0508	0,9458
Nicosia	2018	1,9001	0,0163	1,8738	1,9236	0,0498	0,8591
Nicosia	2019	1,8983	0,0181	1,8701	1,9224	0,0523	0,9556
Barcelona	2017	1,8948	0,0241	1,8565	1,9210	0,0645	1,2696
Barcelona	2018	1,9002	0,0221	1,8641	1,9238	0,0597	1,1645
Barcelona	2019	1,8964	0,0239	1,8541	1,9207	0,0667	1,2610
Madrid	2017	1,8918	0,0243	1,8486	1,9211	0,0725	1,2851
Madrid	2018	1,8968	0,0219	1,8596	1,9243	0,0647	1,1541
Madrid	2019	1,8945	0,0215	1,8580	1,9173	0,0593	1,1357
Rijeka	2017	1,8883	0,0282	1,8376	1,9207	0,0831	1,4916
Rijeka	2018	1,8912	0,0269	1,8477	1,9238	0,0761	1,4220
Rijeka	2019	1,8900	0,0270	1,8415	1,9222	0,0808	1,4294
Amsterdam	2017	1,8788	0,0466	1,7965	1,9258	0,1293	2,4790
Amsterdam	2018	1,8752	0,0465	1,7884	1,9184	0,1300	2,4797
Amsterdam	2019	1,8782	0,0432	1,7931	1,9233	0,1302	2,3005
Wroclav	2017	1,8809	0,0413	1,7912	1,9228	0,1316	2,1938
Wroclav	2018	1,8762	0,0405	1,7958	1,9235	0,1277	2,1563
Wroclav	2019	1,8787	0,0409	1,7920	1,9213	0,1294	2,1779
Vilnius	2017	1,8720	0,0477	1,7948	1,9213	0,1266	2,5464
Vilnius	2018	1,8709	0,0526	1,7732	1,9303	0,1571	2,8126
Vilnius	2019	1,8687	0,0507	1,7721	1,9208	0,1487	2,7106
Bergen	2017	1,8454	0,0744	1,7051	1,9165	0,2114	4,0296
Bergen	2018	1,8381	0,0781	1,6942	1,9065	0,2123	4,2468
Bergen	2019	1,8525	0,0568	1,7509	1,9127	0,1618	3,0639



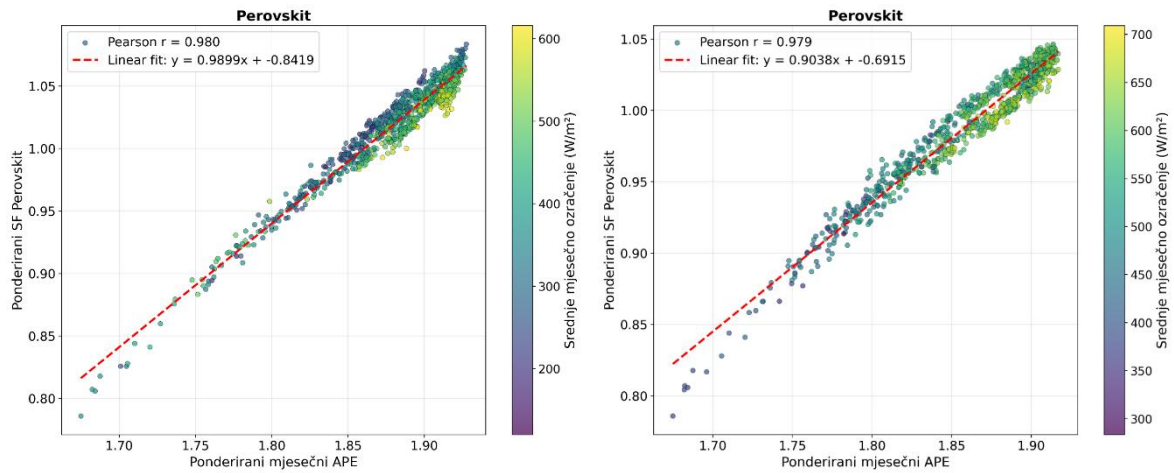
Slika A.1 Odnos mjesečnih vrijednosti SF i APE za sve uvjete neba (lijevo) i vedro nebo (desno) za CZTSSe



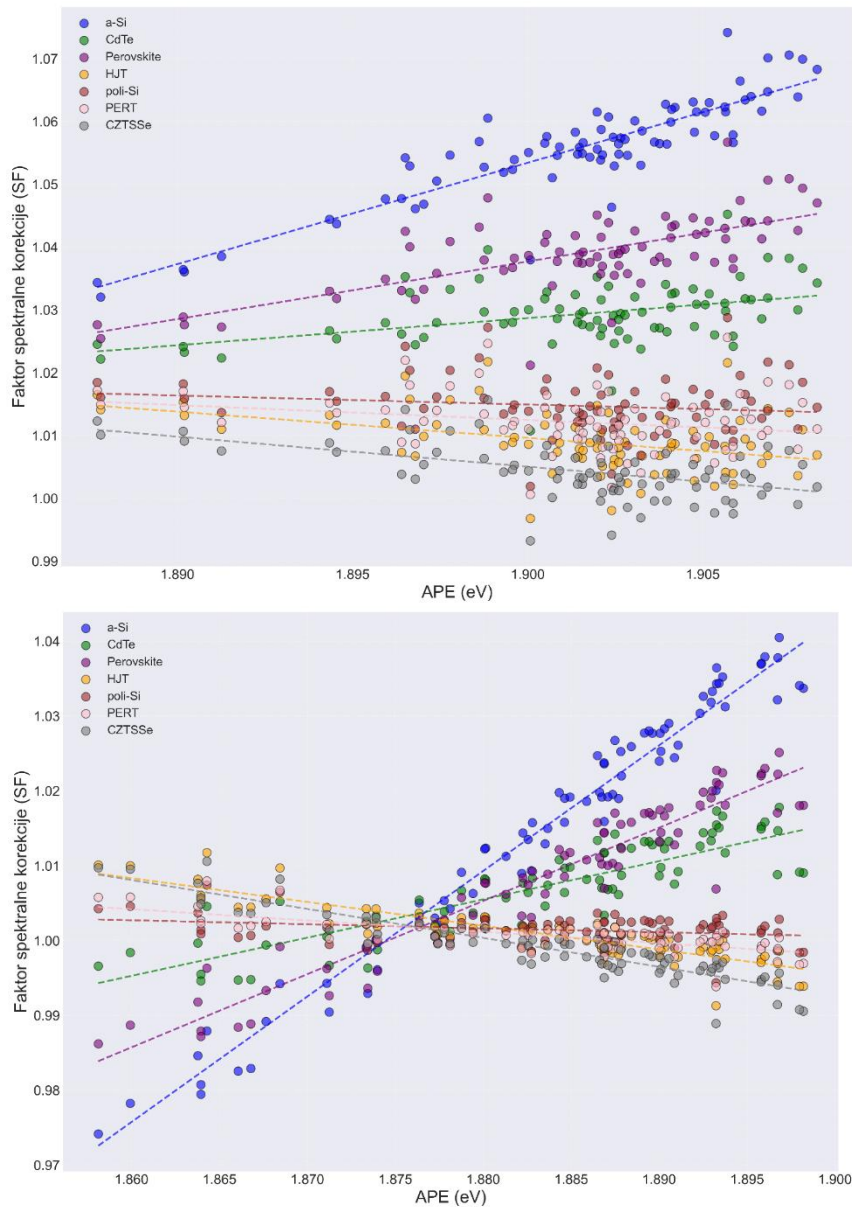
Slika A.2 Odnos mjesečnih vrijednosti SF i APE za sve uvjete neba (lijevo) i vedro nebo (desno) za mono-Si PERT



Slika A.3 Odnos mjesečnih vrijednosti SF i APE za sve uvjete neba (lijevo) i vedro nebo (desno) za poli-Si Al-BSF



Slika A.4 Odnos mjesečnih vrijednosti SF i APE za sve uvjete neba (lijevo) i vedro nebo (desno) za perovskit



Slika A.5 Odnos godišnjih vrijednosti SF i APE za sve uvjete neba (gore) i vedro nebo (dolje)

Tablica A.7 Klasteri (prvi broj) i subklasteri (drugi broj) kojima pripada svaka lokacija

Lokacija	CdTe	Perovskit	mono-Si HJT
Amsterdam	3 1	2 1	1 1
Athens	0 0	0 0	2 0
Barcelona	0 1	0 1	2 0
Bergen	3 1	3 0	0 0
Berlin	2 0	2 0	1 0
Bern	3 0	1 0	2 1
Bilbao	1 0	1 1	2 1
Birmingham	2 1	3 1	0 1
Brasov	2 0	1 0	2 1
Bratislava	1 0	1 0	2 1
Brno	2 0	1 1	1 1
Bruxelles	2 1	2 1	1 1
Bucharest	0 1	0 1	2 0
Budapest	1 0	1 0	1 0
Burgas	0 1	0 1	2 0
Cologne	3 1	2 1	1 1
Constanta	0 1	0 1	2 0
Copenhagen	3 1	3 0	1 1
Cork	1 1	2 1	0 0
Debrecen	1 0	1 0	1 0
Dublin	1 1	3 1	0 1
Eindhoven	2 1	2 1	1 1
Esbjerg	3 1	3 0	1 1
Gothenburg	3 0	3 0	1 1
Graz	2 0	1 1	1 1
Hamburg	3 1	3 0	0 0
Helsinki	3 0	2 0	1 1
Iasi	0 1	0 1	1 0
Katerini	0 0	0 0	2 0
Kavala	0 0	0 0	2 0
Koper	0 1	0 1	1 0
Krakow	1 0	1 1	1 0
Kranj	2 0	1 0	2 1
Limassol	0 1	0 1	2 0
Lisbon	1 0	0 1	3 1
Ljubljana	1 0	1 0	2 1
London	3 1	3 0	0 0
Luxembourg	3 0	2 0	2 1
Madrid	3 0	1 0	3 0
Manchester	3 1	3 1	0 1
Marseille	0 1	0 0	2 0
Milano	1 0	1 0	1 0

Munchen	2 0	1 1	2 1
Nantes	1 0	1 0	1 1
Naples	0 1	0 1	2 0
Nicosia	0 0	0 0	2 0
Nitra	1 0	1 0	1 0
Osijek	0 1	0 1	2 0
Oslo	3 0	3 0	1 1
Palermo	0 0	0 0	2 0
Paris	2 1	2 1	1 1
Plovdiv	1 0	0 0	2 0
Plymouth	1 1	1 1	1 1
Porto	1 0	0 1	3 1
Prague	2 0	1 1	2 1
Riga	3 0	3 0	1 1
Rijeka	0 1	0 1	2 0
Roma	0 0	0 1	2 0
Seville	1 0	0 0	3 0
Sofia	2 0	1 0	2 0
Split	0 0	0 0	1 0
Stockholm	3 0	3 0	0 0
Strasbourg	2 0	1 1	2 1
Stuttgart	2 0	1 1	2 1
Szeged	1 0	1 0	1 0
Talinn	3 0	2 0	2 1
Thessaloniki	0 0	0 0	2 0
Thira	0 0	0 0	2 0
Toulouse	1 0	0 1	2 0
Udine	1 0	1 0	1 0
Valencia	1 0	0 1	2 0
Valletta	0 0	0 0	2 0
Varna	0 1	0 1	2 0
Vienna	1 1	1 1	2 1
Vilnius	3 0	2 0	1 1
Warsav	2 0	2 0	1 0
Wroclav	1 0	1 0	1 0
Zagreb	0 1	0 1	2 1
Zurich	1 0	1 0	2 1

PRILOG B

Tablica B.1 Popis značajki korištenih kod metode slučajne šume

Broj	Značajka
1	$AM_a \cdot K_t$
2	T^2
3	T
4	$T \cdot RH$
5	$AM_a \cdot K_t \cdot R_d$
6	$K_t \cdot R_d$
7	RH
8	B_n^2
9	D/B_n
10	B_n
11	$T \cdot G$
12	AM_a^{-1}
13	$\ln R_d$
14	R_d
15	R_d^2
16	$K_t \cdot G \cdot T$
17	D
18	$AM_a \cdot R_d$
19	e^{-Kt}
20	$\ln G$
21	G
22	$\ln K_t$
23	K_t^2
24	AM
25	K_t
26	AM_a^2
27	AM_a^3
28	AM_a^4
29	$\ln AM_a$
30	T^{-1}
31	$e^{-Kt} \cdot e^{-1}$
32	$AM_a^{-1,5}$
33	K_t^{-1}
34	P

Broj	Značajka
35	$\frac{AM}{\sqrt{W}}$
36	$AM \cdot AOD \cdot AE$
37	AE
38	$\ln AM \cdot W$
39	$W \cdot RH$
40	$\frac{W}{\ln AM}$
41	$AM \cdot W$
42	$AOD \cdot AE$
43	$e^{AOD \cdot AE}$
44	$\ln W$
45	W^2
46	\sqrt{W}
47	W
48	e^W
49	$W \cdot AOD$
50	$AM \cdot AOD$
51	$AM \cdot W \cdot RH$
52	$AM^2 \cdot AOD$
53	$\ln AM \cdot AOD$
54	$\ln AOD$
55	AOD^2
56	AOD

ŽIVOTOPIS

Ivan Bevanda rođen je 15. studenog 1991. godine. Nakon završene Gimnazije Mostar, 2010. upisuje studij Elektrotehnike i informacijske tehnologije na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje (FESB) u Splitu. Diplomirao je 2015. godine pod mentorstvom profesora Josipa Musića.

Od listopada 2015. do svibnja 2017. radio je kao inženjer automatizacijskih sustava u tvrtki Financ d.o.o. u Mostaru. Od svibnja 2017. zaposlen je na Fakultetu strojarstva, računarstva i elektrotehnike Sveučilišta u Mostaru, najprije kao asistent, a od prosinca 2020. kao viši asistent. U okviru nastavnih djelatnosti sudjeluje u izvođenju vježbi iz kolegija Osnove elektrotehnike 1 i 2, Automatsko upravljanje, Računalno upravljanje sustavima, Digitalna elektronika, Ugradbeni računalni sustavi i Osnove automatizacije. Osim nastavnog rada, aktivan je istraživač na više međunarodnih projekata. U okviru međunarodnog projekta 3Smart (2017.-2019.) bavio se razvojem modularnog programskog alata za upravljanje energijom na razini zgrada i distribucijske mreže te izradom pojednostavljenih dinamičkih modela zgrada. U sklopu tog projekta proveo je pola godine na akademskom usavršavanju na Fakultetu elektrotehnike i računarstva (FER) u Zagrebu (2017./2018.). Od 2020. sudjeluje u projektu ICSMED, usmjerenom na povećanje konkurentnosti malih i srednjih poduzeća kroz digitalizaciju, s posebnim naglaskom na primjenu IoT-a u proizvodnji. Sudjelovao je i u ERASMUS+ projektima PARTISH i DUALSci, a trenutno sudjeluje na NEST4WB projektu. Bio je na 12 jednotjednih Erasmus razmjena nastavnog osoblja za držanje nastave i trening diljem Europe.

U akademskoj 2021./2022. upisuje poslijediplomski doktorski studij na FESB-u u Splitu pod mentorstvom profesora Tihomira Bettija. Položio je stručni ispit iz elektrotehnike 2019. godine. 2020. godine je završio program obuke za energetske preglede i energetske certificiranje zgrada. Sudjelovao je na više međunarodnih konferencija (DAAAM 2018., 2020.; SpliTech 2022. i 2025.; BH K CIRED 2020.) i u organizaciji dvije međunarodne konferencije DAAAM 2020. i 2021. Ukupno je objavio 12 radova. Od toga je 7 radova objavljeno tijekom poslijediplomskog studija (3 znanstvena rada u časopisima A kategorije, 4 znanstvena rada C kategorije) koji su vezani za područje fotonaponskih sustava.

CURRICULUM VITAE

Ivan Bevanda was born on 15 November 1991. After completing his secondary education at the Gymnasium in Mostar, he enrolled in the Electrical Engineering and Information Technology study programme at the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture (FESB) in Split in 2010. He graduated in 2015 under the mentorship of Professor Josip Musić.

From October 2015 to May 2017, he worked as an automation systems engineer at Financ d.o.o. in Mostar. In May 2017, he joined the Faculty of Mechanical Engineering, Computing and Electrical Engineering at the University of Mostar, initially as a teaching assistant and, from December 2020, as a senior teaching assistant. In his teaching role, he is involved in delivering exercises for the following courses: Fundamentals of Electrical Engineering 1 and 2, Automatic Control, Computer-Controlled Systems, Digital Electronics, Embedded Computer Systems, and Fundamentals of Automation. Alongside his teaching duties, he is an active researcher on several international projects. Within the international 3Smart project (2017-2019), he worked on the development of a modular software tool for energy management at the building and distribution grid level, as well as on the creation of simplified dynamic models of buildings. As part of this project, he spent six months on academic training at the Faculty of Electrical Engineering and Computing (FER) in Zagreb (2017/2018). Since 2020, he has been participating in the ICSMED project, aimed at increasing the competitiveness of small and medium-sized enterprises through digitalisation, with a particular focus on the application of IoT in production. He has also been involved in the ERASMUS+ projects PARTISH and DUALSci, and is currently participating in the NEST4WB project. He has undertaken 12 one-week Erasmus staff mobility exchanges for teaching and training purposes across Europe.

In the 2021/2022 academic year, he enrolled in the postgraduate doctoral study programme at FESB in Split under the mentorship of Professor Tihomir Betti. He has passed the professional engineering examination in 2019. In 2020 he completed a training programme for energy audits and energy certification of buildings. He has participated in several international conferences (DAAAM 2018, 2020; SpliTech 2022 and 2025; BH K CIRED 2020) and was involved in the organisation of two international DAAAM conferences in 2020 and 2021. He has published a total of 12 papers, of which 7 were published during his doctoral studies - 3 in Category A journals and 4 in Category C journals - all within the field of photovoltaic systems.