

Analiza odbačene proizvodnje hibridnih elektrana uslijed ograničenja priključne snage

Meglić, Antun

Doctoral thesis / Disertacija

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:179:625840>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-03**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture - University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Antun Meglič

**ANALIZA ODBAČENE PROIZVODNJE HIBRIDNIH
ELEKTRANA USLIJED OGRANIČENJA PRIKLJUČNE
SNAGE**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Split, 2024.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Antun Meglić

***Analiza odbačene proizvodnje hibridnih elektrana
uslijed ograničenja priključne snage***

DOKTORSKA DISERTACIJA

Split, 2024.

Doktorska disertacija je izrađena pri Zavodu za elektroenergetiku,
Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje

Mentor: Prof. dr. sc. Ranko Goić

Rad br. 197

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

Ključne riječi: hibridna elektrana, vjetroelektrana, sunčana elektrana, priključna snaga, odbačena proizvodnja, vremenska rezolucija

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Elektrotehnika

Znanstvena grana: Elektroenergetika

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

Mentor rada: Prof. dr. sc. Ranko Goić

Broj stranica: 168

Broj slika: 104

Broj tablica: 5

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 139

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:

1. Izv. prof. dr. sc. Damir Jakus, FESB, Split
2. Prof. dr. sc. Petar Sarajčev, FESB, Split
3. Izv. prof. dr. sc. Ivan Rajšl, FER, Zagreb
4. Izv. prof. dr. sc. Tihomir Betti, FESB, Split
5. Doc. dr. sc. Josip Vasilj, FESB, Split

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:

1. Prof. dr. sc. Damir Jakus, FESB, Split
2. Prof. dr. sc. Petar Sarajčev, FESB, Split
3. Izv. prof. dr. sc. Ivan Rajšl, FER, Zagreb
4. Izv. prof. dr. sc. Tihomir Betti, FESB, Split
5. Izv. prof. dr. sc. Josip Vasilj, FESB, Split

Disertacija obranjena dana: 2. veljače 2024.

Analiza odbačene proizvodnje hibridnih elektrana uslijed ograničenja priključne snage

Sažetak

U ovoj doktorskoj disertaciji analizirana je odbačena proizvodnja hibridnih elektrana koje se sastoje od vjetroelektrane (VE) i sunčane elektrane (SE) instaliranih snaga $>1 \text{ MW}/1 \text{ MWp}$, uslijed ograničenja priključne snage. Proizvodnja VE i SE karakterizirana je naglim fluktuacijama koje se primjenom niskih vremenskih rezolucija poput 1 h ne mogu uočiti, zbog čega se proračunom odbačene proizvodnje primjenom niskih vremenskih rezolucija podcjenjuje stvarna odbačena proizvodnja. Analiza odbačene proizvodnje provedena je pri različitim vremenskim rezolucijama proizvodnje VE i SE, s obzirom na omjer priključne/instalirane snage, udio SE u hibridnoj elektrani i veličinu hibridne elektrane. Na temelju istraživanja fluktuacija snage VE i SE, zaključuje se da je primjena klasičnih modela VE i SE za analizu odbačene proizvodnje opravdana samo pri nižim vremenskim rezolucijama ($\geq 10 \text{ min}$) jer ne uvažavaju efekt poravnanja. Stoga je predložen specijalizirani model hibridne elektrane koji uvažava efekt poravnanja i omogućava precizniju procjenu odbačene proizvodnje, a time i istraživanje utjecaja veličine hibridne elektrane na odbačenu proizvodnju. Rezultati istraživanja daju preporuke o adekvatnoj vremenskoj rezoluciji s kojom je moguće ostvariti precizniju procjenu odbačene proizvodnje u hibridnim elektranama.

Ključne riječi:

hibridna elektrana, vjetroelektrana, sunčana elektrana, priključna snaga, odbačena proizvodnja, vremenska rezolucija

Analysis of hybrid power plants curtailment losses due to grid connection power limit

Abstract

In this doctoral thesis, the curtailment losses in hybrid power plants (HPPs) consisting of wind farm (WF) and solar PV power plant with installed capacities >1 MW/1 MWp have been analysed considering grid connection limit. The power output from both WF and solar PV is characterized by abrupt fluctuations, which cannot be detected when applying low time resolutions such as 1 hour. This leads to the underestimation of the actual curtailment losses when such resolutions are used. The analysis of curtailment losses has been conducted across different time resolutions for WF and solar PV production, considering the ratio of grid cut-off power and HPP installed capacity, the share of solar PV in the HPP, and the size of the HPP. Based on the study of power fluctuations in WF and solar PV, it was concluded that the use of conventional WF and solar PV models for the analysis of curtailed production is justified only at lower time resolutions (>10 min) as conventional models do not consider the smoothing effect. Therefore, a specialized model of the HPP has been proposed that accounts for the smoothing effect. This provides a more accurate estimation of the curtailment losses and provides insight into how the HPP size influences these losses. The research results offer recommendations on the appropriate time resolution for accurate estimation of curtailment losses in HPPs.

Keywords:

hybrid power plant, wind farm, solar PV farm, grid connection limit, curtailment losses, time resolution

Sadržaj

Sažetak.....	iv
Abstract.....	v
Popis tablica	xi
Popis slika.....	xii
Popis oznaka	xvii
1. UVOD.....	1
1.1 Motivacija i problematika	1
1.2 Pregled dosadašnjih istraživanja	3
1.3 Ciljevi i svrha znanstvenog istraživanja	7
1.4 Hipoteze.....	7
1.5 Struktura disertacije	8
2. UVOD U MODELIRANJE VJETROELEKTRANA I SUNČANIH ELEKTRANA.....	10
2.1 Modeliranje vjetroelektrane	10
2.1.1 Varijabilnost vjetra na lokaciji.....	10
2.1.2 Dugoročna korekcija podataka	13
2.1.3 Krivulja snage vjetroagregata	13
2.1.4 Optimizacija smještaja vjetroagregata.....	14
2.1.5 Gubici u vjetroelektranama	15
2.2 Modeliranje sunčane elektrane	16
2.2.1 Komponente sunčevog zračenja	17
2.2.2 Preračunavanja horizontalnih komponenti sunčevog zračenja pod kutem FN modula	19
2.2.3 Proračun DC snage	20
2.2.4 Energetski gubici u sunčanim elektranama	20
3. HIBRIDIZACIJA VJETROELEKTRANA I SUNČANIH ELEKTRANA.....	25
3.1 Topologije hibridnih elektrana i upravljanje	25
3.2 Komplementarnost proizvodnje vjetroelektrana i sunčanih elektrana	28
3.2.1 Klasifikacija komplementarnosti.....	29
3.2.2 Metrike za kvantifikaciju komplementarnosti	30
3.2.3 Proizvodni profili vjetroelektrana	33
3.3 Odbačena proizvodnja zbog ograničene priključne snage	35

3.3.1	Definicija odbačene proizvodnje	35
3.3.2	Problematika procjene odbačene proizvodnje	38
3.3.3	Ograničenje priključne snage.....	39
4.	ANALIZA ODBAČENE PROIZVODNJE PRI NIŽIM VREMENSKIM REZOLUCIJAMA	43
4.1	Ulazni podaci za VE	44
4.2	Stohastički model raspoloživosti i podbačaja VE.....	45
4.3	Ulazni podaci za SE.....	47
4.4	Varijante proračuna i ostali ulazni podaci	48
4.5	Analiza odbačene proizvodnje u osnovnoj varijanti.....	49
4.6	Ovisnost odbačene proizvodnje o instaliranoj snazi SE.....	57
4.7	Ovisnost odbačene proizvodnje o udjelu snaga VE/SE i priključnoj snazi	60
5.	MODELIRANJE VJETROELEKTRANA I SUNČANIH ELEKTRANA PRI VISOKIM VREMENSKIM REZOLUCIJAMA	62
5.1	Analiza varijacija proizvodnje primjenom wavelet transformacije.....	62
5.1.1	Uvod u Wavelet transformaciju	63
5.1.2	Metoda maksimalnog preklapanja diskretne wavelet transformacije.....	66
5.1.3	Multirezolucijska analiza	68
5.2	Prigušenje fluktuacija snage vjetroagregata i efekt poravnanja u vjetroelektranama	71
5.2.1	Ulazni podaci	71
5.2.2	Dinamičke karakteristike vjetroagregata	72
5.2.3	Analiza efekta poravnanja primjenom MODWT-a	75
5.3	Efekt poravnanja u sunčanim elektranama.....	80
5.3.1	Ulazni podaci	80
5.3.2	Prigušenje fluktuacija u proizvodnji SE	81
5.3.3	Analiza fluktuacija primjenom Fourierove transformacije	81
5.3.4	Analiza fluktuacija primjenom MODWT-a	83
5.4	Model proizvodnje vjetroelektrana kod visokih vremenskih rezolucija	84
5.4.1	Varijacije proizvodnje pri različitim frekvencijskim skalama	85
5.4.2	Skaliranje proizvodnje vjetroagregata	90
5.4.3	Metoda surogata vremenskih serija za visoke frekvencije fluktuacija	95
5.4.4	Ispitivanje predloženog modela vjetroelektrane	99
5.4.5	Ograničenja predloženog modela vjetroelektrane	103

5.5	Model proizvodnje sunčane elektrane kod visokih vremenskih rezolucija	104
5.5.1	Postojeći modeli	105
5.5.2	Predloženi model za SE instalirane snage >1 MWp	110
5.5.3	Ograničenja predloženog modela sunčane elektrane.....	115
5.6	Pregled predloženog modela hibridne elektrane.....	116
5.6.1	Topologija modela hibridne elektrane.....	116
5.6.2	Pregled modela.....	117
6.	ANALIZA ODBAČENE PROIZVODNJE PRI VISOKIM VREMENSKIM REZOLUCIJAMA	119
6.1	Ulazni podaci	119
6.1.1	Podaci za VE.....	119
6.1.2	Podaci za SE	122
6.2	Metoda proračuna odbačene proizvodnje.....	126
6.2.1	Postupak izračuna kod primjene visokih vremenskih rezolucija	126
6.2.2	Odbačena proizvodnja izračunata modelom VE u odnosu na stvarnu proizvodnju VE.....	127
6.2.3	Razmatrani pristup analizi s obzirom na mogućnost formiranja hibridne elektrane	131
6.3	Analiza odbačene proizvodnje kod izgradnje nove hibridne elektrane.....	132
6.3.1	Provedba analize odbačene proizvodnje	132
6.3.2	Utjecaj vremenske rezolucije na procjenu odbačene proizvodnje.....	133
6.3.3	Utjecaj veličine VE i SE	138
6.3.4	Utjecaj omjera priključne i instalirane snage hibridne elektrane.....	141
6.4	Analiza odbačene proizvodnje kod hibridizacije postojeće VE s novom SE.....	142
6.5	Statistička analiza odbačene proizvodnje	147
6.6	Diskusija rezultata.....	150
6.6.1	Ograničenja	151
7.	PREGLED ZNANSTVENOG DOPRINOSA.....	153
8.	ZAKLJUČAK	155
	LITERATURA.....	157
	PRILOZI	165

PRILOG A 166

PRILOG B 167

PRILOG C..... 168

ŽIVOTOPIS

CURRICULUM VITAE

Popis tablica

Tablica 4-1 Godišnje varijacije proizvodnje VE, SE i odbačene proizvodnje tijekom godina visoke raspoloživosti proizvodnje VE	57
Tablica 5-1 Osnovni podaci razmatranih VE	71
Tablica 5-2 Sastavnice gubitaka u SE	113
Tablica 6-1 Raspoloživost mjerenih podataka radne snage i brzine vjetra na gondoli VA1	121
Tablica 6-2 Odbačena proizvodnja po promatranim razdobljima i usporedba 15 min i 1 h rezolucije u odnosu na 1 s rezoluciju	137

Popis slika

Slika 2-1 Vertikalna promjena brzine vjetra.....	11
Slika 2-2 Primjer funkcije gustoće vjerojatnosti Weibullove razdiobe	12
Slika 2-3 Ruža vjetrova na planiranoj lokaciji VE mjerena na anemometru	12
Slika 2-4 P-v karakteristika vjetroagregata (VA) tipa General Electric 2.75-103.....	14
Slika 2-5 Globalno horizontalno zračenje (GHI) tijekom sunčanog dana i tijekom dana s parcijalnom naoblakom – mjereno u 1 min rezoluciji	18
Slika 2-6 Karakteristika efikasnost izmjenjivača u ovisnosti o opterećenju.....	22
Slika 2-7 Efikasnost izmjenjivača pri rasponu opterećenja 10% – 110%	22
Slika 2-8 Dijagram gubitaka iz PVSyst-a za SE instalirane snage 13,5 MWp, fiksnom konstrukcijom i monofacijalnim FN modulima.....	24
Slika 3-1 Topologija hibridne elektrane sa zajedničkim AC sabirnicama	26
Slika 3-2 Topologija hibridne elektrane za zajedničkim DC sabirnicama	27
Slika 3-3 Upravljački sustav hibridne elektrane	28
Slika 3-4 Primjer prosječnog dnevnog proizvodnog profila VE i SE	34
Slika 3-5 Normalizirani prosječni dnevni proizvodni profili 14 VE u Hrvatskoj u 2020. godini	35
Slika 3-6 Ilustracija odbačene proizvodnje	37
Slika 3-7 Procjena odbačene proizvodnje u 1 h vremenskoj rezoluciji.....	39
Slika 3-8 Procjena odbačene proizvodnje u 1 s vremenskoj rezoluciji	39
Slika 3-9 Odziv elektrane na skokovitu promjenu postavne vrijednosti regulatora prema HRN EN 50549-2	40
Slika 3-10 Stvarni odziv vjetroelektrane na skokovitu promjenu postavne priključne snage na regulatoru (P_{max}), mjereno u 10 ms rezoluciji, pri (a) povećanju P_{max} i (b) smanjenju P_{max}	41
Slika 3-11 Fluktuacije proizvodnje VE oko priključne snage	42
Slika 4-1 Dnevna raspoloživost podataka proizvodnje VE u % tijekom razmatranog perioda	44
Slika 4-2 Vremenska serija raspoloživosti VA.....	45
Slika 4-3 Generirane vremenske serije iz windPRO-a i nakon korekcije sa stohastičkim modelima raspoloživosti i podbačaja.....	46
Slika 4-4 Krivulja trajanja vremenskih serija izlazne snage iz (a) windPRO, (b) windPRO uz korekciju s modelom raspoloživosti i (c) windPRO uz korekciju s modelom raspoloživosti i podbačaja	47
Slika 4-5 Linearna interpolacija 1 h podataka proizvodnje SE na 10 min rezoluciju.....	48
Slika 4-6 Vremenski nizovi proizvodnje VE (329,2 MW) i SE (100 MWp), objedinjene proizvodnje VE + SE te odbačene proizvodnje tijekom jedne godine.....	50

Slika 4-7 Raspršeni dijagram proizvodnje hibridne elektrane u odnosu na proizvodnju SE (100 MW) s pripadajućim marginalnim distribucijama.....	51
Slika 4-8 Doprinos raspona odbačene snage ukupnoj odbačenoj proizvodnji	52
Slika 4-9 Prosječna odbačena proizvodnja po mjesecima tijekom razmatranog perioda trogodišnjeg perioda	53
Slika 4-10 Prosječni iznos odbačene proizvodnje po satima tijekom godine	54
Slika 4-11 Učestalost i iznos odbačene proizvodnje tijekom dana s obzirom na proizvodnju VE	55
Slika 4-12 Varijacije distribucije odbačene proizvodnje tijekom desetgodišnjeg perioda.....	56
Slika 4-13 Postotna promjena prosječne godišnje odbačene proizvodnje	57
Slika 4-14 Ovisnost odbačene proizvodnje o omjeru instalirane snage SE/VE	58
Slika 4-15 Interpolacija odbačene proizvodnje s kvadratnom funkcijom	59
Slika 4-16 Distribucija odbačene proizvodnje za tri varijante instalirane snage SE.....	59
Slika 4-17 Distribucija odbačene proizvodnje za širi raspon instalirane snage s naznačenom srednjom vrijednošću i medijanom odbačene proizvodnje	60
Slika 4-18 Ovisnost odbačene proizvodnje o udjelu instalirane snage SE u hibridnoj elektrani (0 – 100%) i omjeru priključne snage i instalirane snage hibridne elektrane (VE + SE) između 60% i 90%...	61
Slika 5-1 Primjer kontinuiranih temeljnih wavelet funkcija	64
Slika 5-2 Skalogram (rezultat kontinuirane wavelet transformacije) ulazne funkcije $y(t)$	65
Slika 5-3 Primjer diskretnih temeljnih wavelet funkcija	66
Slika 5-4 Algoritam za proračun koeficijenata DWT-a	66
Slika 5-5 Primjena metode maksimalnog preklapanja diskretne wavelet transformacije (MODWT) na proizvoljnoj vremenskoj seriji	68
Slika 5-6 MRA vremenske serije radne snage vjetroagregata na prvih pet detaljnih koeficijenata (D1 – D5)	70
Slika 5-7 Ulazna brzina vjetra v_{VA} i mjerena brzina vjetra na anemometru v_{mj}	72
Slika 5-8 Fluktuacije brzine vjetra i proizvodnje vjetroturbine mjerene u 1 sekundnoj rezoluciji.....	74
Slika 5-9 Varijanca brzine vjetra i izlazne snage VA različitih vremenskih skala na lokacijama „A“ i „B“	75
Slika 5-10 Koeficijent korelacije različitih vremenskih skala između dva VA na lokaciji „A“ i „C“	76
Slika 5-11 Usporedba varijance normaliziranih vremenskih serija izlazne snage vjetroturbine i vjetroelegtrane (16 vjetroturbina).....	77
Slika 5-12 Varijanca N_{VA} vjetroagregata u odnosu na jedan VA prikazano na 14 vremenskih skalama .	79
Slika 5-13 Usporedba fluktuacija normaliziranog sunčevog zračenja (POA) i proizvodnje SE 1 MWp te 100 MWp u vremenskoj domeni	81

Slika 5-14 Amplitudna spektralna gustoća normaliziranog sunčevog zračenja na zakošenu plohu i normalizirane proizvodnje SE instalirane snage 1 MWp	82
Slika 5-15 Amplitudni spektar normaliziranog sunčevog zračenja na zakošenu plohu i normalizirane proizvodnje SE instalirane snage 100 MWp	83
Slika 5-16 Varijanca sunčevog zračenja (prvi red) i izlazne radne snage SE 1 MWp (drugi red) pripadajućih vremenskih skala MODWT-a.....	84
Slika 5-17 Varijanca sunčevog zračenja (prvi red) i izlazne radne snage SE 100 MWp (drugi red) pripadajućih vremenskih skala MODWT-a.....	84
Slika 5-18 Indeks efekta poravnanja (SEI) u ovisnosti o broju vjetroagregata u vjetroelektrani, prikazan na skalama 1 – 16.....	87
Slika 5-19 Vrijednosti eksponenta prigušenja (α) pri različitim skalama za travanj 2021.	88
Slika 5-20 Korigirane vrijednosti eksponenta prigušenja i interpolacija Sigmoid krivuljom.....	89
Slika 5-21 Promjene eksponenta prigušenja po mjesecima za VE smještene na kompleksnom terenu.....	90
Slika 5-22 Skaliranje proizvodnje VA na instaliranu snagu VE u 1 s rezoluciji	91
Slika 5-23 Skaliranje proizvodnje VA na instaliranu snagu VE u 15 min rezoluciji	92
Slika 5-24 Metoda skaliranja proizvodnje VA na proizvodnju VE primjenom multirezolucijske analize temeljene na MODWT-u.....	93
Slika 5-25 Usporedba detaljnih koeficijenata MODWT MRA transformacije zbirne proizvodnje osam VA i modela VE dobivenog predloženim skaliranjem proizvodnje VA	94
Slika 5-26 Usporedba drugog detaljnog koeficijent (D2) MODWT MRA za dva različita VA u VE	95
Slika 5-27 Indeks $i(t)$ i surogat indeks $i'(t)$ s obzirom na parametar A	97
Slika 5-28 Originalna vremenska serija $x(t)$ i dva generirana surogata $x'(t)$ za $A=10$ (gore) i $A=50$ (dolje)	97
Slika 5-29 Usporedba detaljnog koeficijenta D2 zbirne proizvodnje osam VA i proizvodnje dobivene primjenom metode surogata vremenskih serija.....	98
Slika 5-30 Metoda skaliranja proizvodnje VA na proizvodnju VE primjenom MODWT MRA i surogata vremenskih serija	99
Slika 5-31 Usporedba ostvarene proizvodnje četiri VA nazivne snage 3200 kW i proizvodnja dobivena predloženim modelom.....	100
Slika 5-32 Empirijski histogram postotnog iznosa fluktuacija zbirne proizvodnje četiri VA za svibanj 2021. za ostvarenu proizvodnju, predloženi model i pojednostavljeni model. Fluktuacije su izražene u (a) 1 sekundnoj i (b) 1 minutnoj rezoluciji.....	102
Slika 5-33 Amplitudni spektar dobiven Fourierovom transformacijom ostvarene proizvodnje četiri VA, predloženog i pojednostavljenog modela	103
Slika 5-34 Model SE kao niskopropusni filter prvog reda za sunčevo zračenje (zasnovano na [48])	106

Slika 5-35 WVM model SE za visoke vremenske rezolucije (zasnovano na [49])	107
Slika 5-36 Promjene fluktuacija proizvodnje za različite prostorne konfiguracije SE (a) kvadratna konfiguracija (lijevo) i pravokutna konfiguracija uz omjer stranica 10:1 (desno) i (b) vremenska serija proizvodnje SE dobivene modelom zasnovanim na [49]	109
Slika 5-37 Usporedba proizvodnje SE za visoke vremenske rezolucije dobivene korištenjem modela zasnovanih na [48] (plavo) i [49] (zeleno).....	110
Slika 5-38 Topologija razmatrane hibridne VE i SE	117
Slika 5-39 Pojednostavljeni grafički prikaz modela hibridne elektrane za visoke vremenske rezolucije.....	118
Slika 6-1 Shema VA s dvostrano napajanim asinkronim generatorom.....	120
Slika 6-2 Raspoloživost podataka (a) radne snage VA i (b) korigirane brzine vjetra mjerene na gondoli VA.....	121
Slika 6-3 Mjerni stup (lijevo) i lokacija mjerne i registracijske opreme u donjem dijelu stupa (desno) .	123
Slika 6-4 Piranometar Delta-T Sunshine montiran na mjernom stupu.....	123
Slika 6-5 Ammonit logger za prikupljanje mjernih podataka.....	124
Slika 6-6 Popis mjerenih kanala loggera Ammonit Meteo - 40.....	125
Slika 6-7 Raspoloživost podataka s piranometra	126
Slika 6-8 Usporedba odbačene proizvodnje korištenjem stvarne proizvodnje VE, predloženog modela VE i pojednostavljenog modela VE pri različitim vremenskim rezolucijama	129
Slika 6-9 Postotna pogreška u odbačenoj proizvodnji kod korištenja predloženog i pojednostavljenog modela VE u odnosu na stvarnu proizvodnju VE pri različitim vremenskim rezolucijama	129
Slika 6-10 Postotno povećanje odbačene proizvodnje u odnosu na 1 s rezoluciju kod primjene stvarne proizvodnje, predloženog i pojednostavljenog modela VE	130
Slika 6-11 Razmatrane varijante analize odbačene proizvodnje	131
Slika 6-12 Odbačena proizvodnja pri različitim vremenskim rezolucijama u hibridnoj elektrani instalirane snage 25,6 MW/25,6 MWp i priključnoj snazi 35,7 MW (period od početka ožujka do kraja svibnja)	134
Slika 6-13 Relativne vrijednosti odbačene proizvodnje u odnosu na 1 s rezoluciju VE i SE (period od početka ožujka do kraja svibnja).....	135
Slika 6-14 Odbačena proizvodnja pri različitim vremenskim rezolucijama u hibridnoj elektrani instalirane snage 25,6 MW/25,6 MWp i priključnoj snazi 35,7 MW (ljetni period od početka lipnja do kraja kolovoza)	136
Slika 6-15 Relativne vrijednosti odbačene proizvodnje u odnosu na 1 s rezoluciju VE i SE (ljetni period od početka lipnja do kraja kolovoza).....	137

Slika 6-16 Postotni iznos ukupne odbačene proizvodnje tijekom cijele godine za raspon vremenskih rezolucija 1 min – 1 h s naznačenim postotnim smanjenjem u odnosu na odbačenu proizvodnju u 1 min rezoluciji	138
Slika 6-17 Utjecaj instalirane snage VE i SE na odbačenu proizvodnju pri različitim vremenskim rezolucijama za travanj 2021.	140
Slika 6-18 Ovisnost odbačene proizvodnje o vremenskoj rezoluciji i instaliranoj snazi VE i SE zasnovana na periodu od ožujka do svibnja	141
Slika 6-19 Ovisnost odbačene proizvodnje kod VE i SE instalirane snage 25,6 MW/25,6 MWp pri različitim omjerima priključne i instalirane snage	142
Slika 6-20 Odbačena proizvodnja u % kod proširenja VE sa SE i priključnoj snazi 100% iznosa instalirane snage VE – usporedba 1 min i 1 h rezolucije.....	144
Slika 6-21 Odbačena proizvodnja u % kod proširenja VE sa SE i priključnoj snazi 100% iznosa instalirane snage VE – usporedba 1 min i 15 min rezolucije	144
Slika 6-22 Odbačena proizvodnja u % kod proširenja VE sa SE i priključnoj snazi 90% iznosa instalirane snage VE – usporedba 1 min i 1 h rezolucije.....	145
Slika 6-23 Odbačena proizvodnja u % kod proširenja VE sa SE i priključnoj snazi 90% iznosa instalirane snage VE – usporedba 1 min i 15 min rezolucije	146
Slika 6-24 Odbačena proizvodnja pri proširenju postojeće VE 32 MW sa SE u rasponu 1 MWp – 32 MWp prikazana kao (a) % vrijednost u odnosu na proizvodnju SE za 1 s, 1 min, 15 min i 1 h rezoluciji i (b) iznos 1 min, 15 min i 1 h u odnosu na iznos u 1 s rezoluciji, izražen u % 1 s odbačene proizvodnje	147
Slika 6-25 Distribucija vjerojatnosti pojave odbačene proizvodnje u 1 s rezoluciji	148
Slika 6-26 Doprinos pojedinačnog raspona odbačene snage ukupnoj odbačenoj proizvodnji za 1 h, 15 min, 1 min i 1 s rezoluciju	149
Slika B-1 Odbačena proizvodnja pri različitim vremenskim rezolucijama u hibridnoj elektrani instalirane snage 25,6 MW/25,6 MWp i priključnoj snazi 35,7 MW za period od siječnja do veljače....	167
Slika C-1 Odbačena proizvodnja pri različitim vremenskim rezolucijama u hibridnoj elektrani instalirane snage 25,6 MW/25,6 MWp i priključnoj snazi 35,7 MW za period od rujna do studenog.....	168

Popis oznaka

AC	Izmjenična struja
AM	Air Mass
ANN	Artificial Neural Networks
AOI	Angle of Incidence
ASD	Amplitudna gustoća razdiobe
BOM	Australian Bureau of Meteorology
CAMS	Copernicus Atmosphere Monitoring Service
CFD	Computational Fluid Dynamics
CWT	Kontinuirana wavelet transformacija
DC	Istosmjerna struja
DFIG	Dvostrano napajani asinkroni generator
DHI	Difuzno horizontalno zračenje
DLR	German Aerospace Center
DNI	Direktno normalno zračenje
DWM	Dynamic Wake Meander
DWT	Diskretna wavelet transformacija
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ERA	ECMWF atmospheric reanalysis
EVM	Eddy Viscosity Model
EWEA	European Wind Energy Association
FN	Fotonaponski
FT	Fourierova transformacija
GCR	Ground Coverage Ratio
GHI	Globalnog horizontalno zračenje
HEP-ODS	Hrvatska elektroprivreda – operator distribucijskog sustava
HOPS	Hrvatski operator prijenosnog sustava
HPP	Hybrid Power Plant
HRN	Hrvatska norma
IAM	Incidence Angle Modifier
IEC	International Electrotechnical Commission

INSEL	Integrated Simulation Environment Language
IQR	Interquartile range
KNMI2	Royal Netherlands Meteorological Institute
LES	Largy-Eddy Simulation
LID	Lightning Induced Degradation
MAE	Srednja apsolutna pogreška
MCP	Measure Correlate Predict
MODWT	Metoda maksimalnog preklapanja diskretne wavelet transformacije
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MRA	Multirezolucijska analiza
MSE	Srednja kvadratna pogreška
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NN	Niski napon
NTF	Nacelle Transfer Function
NWP	Numerical Weather Prediction
OIE	Obnovljivi izvori energije
PCC	Point of Common Coupling
POA	Plane-of-array
PR	Performance Ratio
PSD	Spektralna gustoća snage
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SE	Sunčana elektrana
SEI	Smoothing Effect Index
SMHI	Swedish Meteorological and Hydrological Institute
SN	Srednji napon
SSS	Small Shuffle Surrogate
STC	Standard Test Conditions
SVR	Support Vector Regression
VA	Vjetroagregat
VE	Vjetroelektrana

VN	Visoki napon
VR	Variability Reduction
WLM	Wake effect losses
WMTSA	Wavelet Methods for Time Series Analysis
WVM	Wavelet variability model

1. UVOD

1.1 Motivacija i problematika

Proizvodnja varijabilnih obnovljivih izvora energije (OIE), od kojih su najznačajnije vjetroelektrane (VE) i sunčane elektrane (SE), u odnosu na konvencionalne izvore energije praćena je relativno niskim faktorom angažiranja. Da bi se vršna snaga elektrane (maksimalna snaga koju elektrana tehnički može isporučiti u mrežu) prenijela bez gubitaka, potrebno je dimenzionirati prijenosnu mrežu s obzirom na vršnu snagu elektrane, što nekada zahtijeva visoke ili čak neprihvatljive troškove, odnosno takav zahtjev često nije ekonomski opravdan u slučaju kratkog trajanja vršne snage. Stoga se dimenzioniranje odnosa vršne i priključne snage (maksimalna snaga koju je dopušteno isporučiti u mrežu) treba promatrati kao kompromis između:

- Gubitaka energije u slučaju da je vršna snaga elektrane veća od priključne snage, a koji nastaju ograničenjem snage elektrane u razdobljima kad je raspoloživa neto snaga elektrane (snaga koju u nekom trenutku elektrane može isporučiti u mrežu) veća od priključne snage.
- Dodatnih troškova izgradnje infrastrukture za priključak elektrane na mrežu i dogradnju mreže da bi priključna snaga bila jednaka vršnoj snazi elektrane, u odnosu na navedene troškove u slučaju da je priključna snaga manja od vršne snage.

Dakle, s obzirom da dimenzioniranje priključka na mrežu i odgovarajuće dogradnje prijenosne mreže na način da se omogući plasman vršne proizvodnje varijabilnih OIE najčešće nije ekonomski opravdano, na raspolaganju su različiti pristupi koji omogućuju rješavanje problema na ekonomski efikasniji način. Prvo rješenje je integracija sustava za pohranu električne energije u VE ili SE, koji se može iskoristiti za tzv. „peglanje“ ili poravnanje proizvodnje, tj. smanjenje ukupne varijabilnosti elektrane i redukciju izlazne snage ukoliko je to potrebno, pohranjujući privremeno dio električne energije iz elektrane u sustav za pohranu energije. Navedeno omogućava i općenito redukciju proizvodnje u slučajevima kad je to zbog sigurnosti rada elektroenergetskog sustava nužno ili je zbog ukupne ekonomike pogona OIE ekonomski opravdano (npr. troškovi energije uravnoteženja). Međutim, iako sustavi za pohranu energije imaju važnu ulogu u budućem elektroenergetskom sustavu, za prethodno navedenu namjenu, ali i daleko šire, njihova komercijalna rješenja još uvijek nisu dosegla zadovoljavajuću razinu isplativosti.

Drugo rješenje, vezano samo za gore navedeni odnos vršne snage elektrane u odnosu na priključnu snagu, jest tehnička i ekonomska optimizacija vršne/instalirane snage elektrane i pripadajuće odbačene proizvodnje elektrane koji nastaju kao posljedica nejednakosti vršne i priključne snage, u odnosu na povećanje troškova priključka na mrežu odnosno dogradnje mreže u slučaju povećanja priključne snage. Priključna snaga može biti i fiksirana, npr. zbog ograničenog kapaciteta mreže u točki priključenja. U tom slučaju, optimizacija se odnosi na razmatranje isplativosti povećanja ukupne instalirane snage elektrane uz fiksnu priključnu snagu. Tipičan primjer je integracija VE i SE u hibridnu elektranu na istoj ili bliskoj lokaciji koja posjeduje jedinstveno mjesto i zajedničke troškove priključenja na mrežu.

Motivacija za izgradnju VE i SE na istoj ili bliskoj lokaciji proizlazi iz činjenice da je proizvodnja ovih dviju elektrana vrlo često komplementarna na dnevnoj i sezonskoj razini, koristi se dio zajedničke infrastrukture i prava na korištenje zemljišta, ekološki je to često prihvatljivije rješenje itd. Takav pristup, koji najčešće podrazumijeva tzv. „hibridizaciju“ odnosno izgradnju SE na lokaciji na kojoj je već izgrađena VE, je snažno

podržan i preporučen od strane EU u cilju brže, ekonomski povoljnije i ekološki prihvatljivije tranzicije s fosilnih na obnovljive izvore energije. Implementacija navedenog pristupa je u velikom zamahu proteklih godina u zemljama EU i šire, a kao primjer se može navesti Španjolska gdje je uveden detaljni regulatorni okvir za hibridizaciju, kao jedan od poželjnih poslovnih modela u cilju realizacije dodatnih kapaciteta i/ili povećanju proizvodnje električne energije iz OIE [1].

Povoljne karakteristike međusobnog nadopunjavanja proizvedene energije iz VE i SE omogućavaju poddimenzioniranje mrežnog priključka s obzirom da se istovremena vršna snaga oba izvora javlja vrlo rijetko. Povećanjem instalirane snage hibridne elektrane (zbroy instalirane snage VE i SE) u odnosu na priključnu snagu ostvaruje se povećanje faktora angažiranja (s obzirom na maksimalnu snagu priključka) uz minimalne gubitke uslijed ograničenja mrežnog priključka, koje u kontekstu ovog rada nazivamo odbačenom proizvodnjom. Isto je ostvarivo i primjenom samo jedne tehnologije (SE ili VE), te se redovito primjenjuje ukoliko je isto dopušteno zakonodavnim okvirom (npr. za VE je ekonomski najčešće opravdano do cca. 10-15% veće instalirane/vršne snage u odnosu na priključnu snagu). Međutim, pravi tehn-ekonomski efekti se ostvaruju u hibridnim projektima zbog navedene komplementarnosti odnosno uglavnom nekoreliranosti proizvodnje iz VE i SE praktički na svim vremenskim razinama, kod kojih je moguće smanjiti odbačenu proizvodnju značajno više nego u slučaju jedne tehnologije. Prepoznati su sljedeći ključni faktori koji utječu na odbačenu proizvodnju hibridne elektrane koja se sastoji od VE i SE:

- omjer instalirane/priključne snage hibridne elektrane,
- udio instalirane snage pojedinačne tehnologije u ukupnoj instaliranoj snazi hibridne elektrane,
- stupanj komplementarnosti između proizvodnje VE i SE na razmatranoj lokaciji,
- razinu fluktuacija pojedine tehnologije,
- specifičnosti tehnologije i lokacije (instalirana snaga pojedinačnih vjetroagregata (VA), broj i prostorni raspored VA u VE, kompleksnost terena i raspored fotonaponskih modula, fiksna/zakretna montažna konstrukcija, string/centralni inverteri itd.) i
- regulatorni uvjeti (npr. ograničenje maksimalne instalirane snage za pojedinu tehnologiju, fleksibilnost ograničenja priključne snage – eventualna mogućnost kratkoročnih prekoračenja sa ili bez penalizacije itd.).

Odbačena proizvodnja javlja se u vremenskim periodima kada je moguća proizvodnja hibridne elektrane na pragu mreže veća od priključne snage. Zbog naglih promjena brzine vjetra i sunčevog zračenja, koje se manifestiraju fluktuacijama proizvodnje VE i SE, proračun odbačene proizvodnje zahtjeva upotrebu odgovarajuće vremenske rezolucije s kojom je moguće uočiti predmetne fluktuacije snage. Kod primjene nižih vremenskih rezolucija, npr. 1 h rezolucije, javlja se pogreška u proračunu odbačene proizvodnje koja je posljedica zanemarenja fluktuacija snage unutar intervala korištene vremenske rezolucije. Na primjer, unutar-satne fluktuacije snage mogu u pojedinim intervalima rezultirati mogućom proizvodnjom VE + SE većom od priključne snage, a da njihov 1 h prosjek ne premašuje priključnu snagu. Iako je u stvarnosti došlo do odbacivanja proizvodnje unutar 1 h intervala, proračunom odbačene proizvodnje u 1 h rezoluciji taj događaj nije detektiran. Dakle, primjenom nižih vremenskih rezolucija proizvodnje procjenjuje se odbačena proizvodnja koja je uvijek manja u odnosu na stvarnu odbačenu proizvodnju.

Fluktuacije snage u hibridnoj elektrani ovisit će kod VE primarno o broju, tipu i prostornom rasporedu vjetroagregata i kompleksnosti terena (korelaciji proizvodnje vjetroturbina zbog lokalnog utjecaja vjetra),

dok kod SE primarno ovisi o površini i prostornom rasporedu FN modula, te tehnologiji izvedbe montažne konstrukcije (fiksna ili zakretna montažna konstrukcija). Smanjenje fluktuacija zbirne proizvodnje VA u odnosu na proizvodnju jednog VA kod VE ili smanjenja fluktuacije proizvodnje SE kod povećanja površine FN modula naziva se efekt poravnanja snage. Efekt poravnanja je uočljiv samo kod primjene viših vremenskih rezolucija (npr. unutar-satnih), a postepeno se smanjenje sa smanjenjem vremenske rezolucije. Iz prethodno iznesenog slijedi da je za procjenu odbačene proizvodnje potrebno razmotriti i veličinu/instaliranu snagu hibridne elektrane.

1.2 Pregled dosadašnjih istraživanja

U literaturi se mogu pronaći brojni radovi na temu hibridnih elektrana. Prema preglednom radu [2], između 1995. i 2020. godine u bazama Scopus i ScienceDirect objavljeno je 550 znanstvenih radova na temu hibridnih elektrana, od čega se 168 radova odnosi na hibridne elektrane s priključkom na mrežu. Pojam „hibridna elektrana“ ne mora se odnositi na elektranu koja se sastoji od VE i SE, već je općenitiji i može podrazumijevati integraciju bilo koja dva različita tipa tehnologije za proizvodnju električne energije, sa ili bez sustava za pohranu energije [3]. Od objavljenih radova vezanih za hibridne elektrane s priključkom na mrežu, u pregledu literature izdvojeni su radovi koji obrađuju vjetroelektrane i sunčane elektrane sa zajedničkim mjestom priključka na mrežu, općenito bez sustava za pohranu električne energije.

Istraživanje u području hibridnih VE i SE započelo je s temom komplementarnosti vjetra i sunčevog zračenja, pri čemu je u preglednom radu [4] istaknuto da je broj radova koji obrađuju komplementarnost vjetra i sunčevog zračenja, ali i proizvodnje VE i SE, u značajnom porastu od 2008. godine. Primjetno je da se u literaturi često upotrebljava i izraz anti-korelacija kao sinonim za komplementarnost [3], pri čemu se anti-korelacija dobiva korištenjem Pearsonovog koeficijenta korelacije i kao takva nije prava mjera komplementarnosti. Komplementarnost proizvodnje varijabilnih OIE se klasificira kao vremenska, prostorna i prostorno-vremenska [4]. Međutim, za analizu odbačene proizvodnje hibridnih elektrana na istoj ili bliskoj lokaciji zbog ograničene priključne snage, važna je isključivo vremenska komplementarnost, koja se općenito razmatra između dvaju ili više izvora električne energije na istoj ili dovoljno bliskoj lokaciji. Pod dovoljno bliskom lokacijom podrazumijeva se da je udaljenost VE i SE tako niska da prostorna komplementarnost neće biti izražena. Iako postoji značajni pad u Pearsonovom koeficijentu korelacije između proizvodnje udaljenih VE, te nešto manje za SE, koeficijent korelacije odnosno anti-korelacija između proizvodnje udaljenih VE i SE praktički zadržava konstantu vrijednost s povećanjem udaljenosti (koeficijent u rasponu od -0,1 do -0,3) [5]. Drugim riječima, između udaljenih VE i SE anti-korelacija je zadržana neovisno o udaljenosti između istih (razmatrano do 1500 km udaljenosti). Takav rezultat sugerira da nije potrebna izgradnja SE na istoj lokaciji kao i VE da bi se iskoristila komplementarnost između tehnologija. Vremenska i prostorno-vremenska komplementarnost između VE i SE je istraživana u različitim dijelovima svijeta, od Australije [6], Kine [7], Europe [8]–[11], Meksika [12] i SAD-a [13], a u svim istraživanjima je pokazano da postoji izražena anti-korelacija. Anti-korelacija je prisutna na gotovo svim vremenskim razinama [14], ali najveću vrijednost poprima kod mjesečnih/sezonskih vremenskih skala, te se postepeno smanjenje po iznosu prema višim vremenskim rezolucijama (kraćim intervalima). Pri 1 h rezoluciji, anti-korelacija je slaba, a kod unutar-satnih vremenskih rezolucija je vrlo slaba ili je gotovo nema [5], [9], [11].

Komplementarne karakteristike vjetra i sunčevog zračenja ili snage VE i SE mogu se iskoristiti na način da se VE i SE integriraju na istoj ili bliskoj lokaciji, uz priključak preko jedinstvenog mjesta na mrežu.

Integracijom VE i SE sa zajedničkim mjestom priključka na mrežu ostvaruju se brojne prednosti, od optimizacije elektroenergetske infrastrukture [15]–[18], smanjenja troškova razvoja projekta [15], [17] i troškova održavanja [19], do efikasnijeg iskorištenja zemljišta [17], [20], [21] i drugih prednosti. Razlog zbog kojeg je u prvom redu moguća efikasna integracija VE i SE je komplementarnost predmetnih tehnologija, čime je omogućeno značajnije povećanje instalirane snage VE + SE iza mjesta priključka u odnosu na individualnu VE i SE [22]. Radovi koji obrađuju problematiku dimenzioniranja instalirane snage mogu se podijeliti u dvije povezane grupe. Prva grupa radova orijentirana je na primjenu matematičke optimizacije instalirane snage VE i SE u hibridnoj elektrani, gdje se korištenjem funkcije cilja najčešće zasnovane na ekonomiji projekta donosi odluka o optimalnom omjeru instalirane snage VE i SE. Druga grupa radova detaljnije obrađuje odbačenu proizvodnju, a odabir instalirane snage VE i SE u hibridnoj elektrani zasniva se na iznosu odbačene proizvodnje.

Najveći broj radova u literaturi je posvetio pažnju upravo matematičkoj optimizaciji instalirane snage VE/SE u hibridnoj elektrani [3]. Matematička optimizacija instalirane snage VE/SE u hibridnoj elektrani podrazumijeva postavljanje funkcije cilja i ograničenja unutar kojih se traži optimalna snaga VE i SE. Cilj optimizacije je najčešće ekonomske prirode, poput maksimizacije neto sadašnje vrijednosti projekta [22]–[26] ili minimizacije niveliranog troška električne energije [26]–[30], a ograničenja su tehničke naravi i najčešće podrazumijevaju ograničenje priključne snage koja se ne može mijenjati, te ponekad i ograničenje prijenosne moći priključnog kablenskog voda [25] ili energetskeg transformatora [31]. Međutim, u dijelu obrađenih radova nije fokus samo na ekonomiji projekta, već i drugim faktorima neekonomske prirode poput maksimizacije iskorištenja zemljišta [21], [26], [29], [32], minimizaciji gubitaka [25], [33] ili minimizaciji varijabilnosti proizvodnje [33], [34]. Kada je riječ o funkciji cilja neekonomske prirode, češće je riječ o tzv. multikriterijskim metodama optimizacije koji sadrže više funkcija cilja, a kod kojih se nastoji pronaći kompromis između rješenja, tzv. Pareto optimalnih rješenja. Neki od autora smatraju da je primjena optimizacijske strukture s više funkcija cilja realističniji pristup problemu jer je tijekom planiranja potrebno uvažiti različite procese [27]. Pregledni rad u kojem su obrađene korištene metode matematičke optimizacije u dosadašnjem istraživanju, kao i topologije mreže hibridne elektrane objavljen je u [35]. Rezultate dobivenih radova zasnovanih na matematičkoj optimizaciji je teško interpretirati zbog različitosti korištenih pristupa (najčešće cilja optimizacije) i korištenih ulaznih parametara. Interpretaciju rezultata dodatno otežava činjenica da je analiza zasnovana na lokaciji sa specifičnim klimatskim uvjetima, koji ne moraju biti reprezentativni za ostale lokacije. Rezultat optimizacije, tj. instalirana snaga VE ili SE, značajno ovisi o odabranim ulaznim parametrima, osobito ako je riječ o ekonomskoj optimizaciji. Također, mnogi od spomenutih radova nemaju referentnu alternativu u odnosu na koju se uspoređuju [22].

U prethodnoj navedenoj skupini radova usmjerenje istraživanja je stavljeno na rezultat optimizacije (optimalna instalirana snaga VE i SE), a isti ne posvećuju pažnju odbačenoj proizvodnji u hibridnim elektranama te utjecajnim faktorima koji utječu na odbačenu proizvodnju. Druga skupina radova u kojima se primarno analizira odbačena proizvodnja hibridnih VE + SE koji su rezultat „viška“ vršne snage u odnosu na priključnu snagu je značajno manjeg obima, iako je većina radova objavljena u posljednje tri godine. Isto je zaključeno u nedavno objavljenim preglednim radovima [3], [4], u kojima se navodi da je područje hibridnih VE i SE još uvijek u slabo istraženom fazi. U ovoj skupini radova, autori nastoje proračunom gubitaka zbog ograničene priključne snage pronaći takvu konfiguraciju hibridne elektrane s kojom će se odbačena proizvodnja ograničiti na prihvatljivu razinu. Pritom se radovi s obzirom na prostornu tematiku i klimatske uvjete mogu podijeliti na radove koji energetske gubitke analiziraju na individualnoj lokaciji

[17], [25], [31], [36], više lokacija unutar jedne regije ili države [37]–[39] i usporedbu na širem geografskom području između više država [40]. U gotovo svim navedenim radovima, odbačena proizvodnja se razmatra s obzirom na udio instalirane snage VE/SE u hibridnoj elektrani, a u većem dijelu razmatran je i utjecaj omjera priključne/instalirane snage hibridne elektrane.

Ludwig i dr. [17] proveli su proračun odbačene proizvodnje hibridne VE + SE sa zajedničkim mjestom priključka na mrežu, korištenjem 15 min podataka brzine vjetra usrednjenih na 1 h rezoluciju i 1 h podataka komponenti sunčevog zračenja na istoj lokaciji. Autori su pokazali da se najmanji gubici proizvodnje zbog ograničene priključne snage javljaju kod približno jednakog udjela VE/SE u hibridnoj elektrani, te da je priključnu snagu moguće reducirati do 70% instalirane snage hibridne elektrane uz ograničenje odbačene proizvodnje na zanemarivih 0,07% ukupne proizvedene energije. Kod istog odnosa priključne/instalirane snage elektrane, odbačena proizvodnja bi iznosila 6,2% u slučaju 100% udjela VE te 3,6% kod 100% udjela SE. Budući da su analizu gubitaka radili u 1 h rezoluciji proizvodnje, autori ističu da vremenska rezolucija potencijalno može utjecati na procjenu gubitaka redukcije proizvodnje. Slična analiza napravljena je i u ranijem radu [31], u kojem su autori razmatrali odbačenu proizvodnju primjenom operativnih podataka hibridne elektrane sastavljene od VE instalirane snage 24 MW i SE instalirane snage 10,3 MWp. Autori su također došli do istog rezultata kao i u [17], odnosno da se minimum gubitaka javlja kod približno jednakog udjela VE/SE u hibridnoj elektrani. Iako su za proračun odbačene proizvodnje koristili 1 min prosjeke izlazne radne snage VE i SE, autori nisu proveli analizu odbačene proizvodnje pri različitim rezolucijama s ciljem ispitivanja utjecaja vremenske rezolucije na procjenu odbačene proizvodnje. U [25], razmatrana je odbačena proizvodnja u priobalnoj vjetroelektrani instalirane snage 752 MW koja se proširuje s priobalnom SE. Ograničenje isporučene energije u mrežu nije razmatrano na mjestu priključka, već isto proizlazi iz ograničene prijenosne moći podmorskog kabela preko kojega VE i SE evakuiraju proizvedenu električnu energiju u mrežu. Za razliku od prethodna dva rada, sada se razmatra proširenje VE sa SE pri čemu je prijenosna moć (u prethodnim radovima priključna snaga) fiksirana i ne može se dalje povećavati. Rezultati proračuna su pokazali da će odbačena proizvodnja (u % proizvodnje SE) kod proširenja VE sa SE u rasponu 100 – 1000 MWp iznositi 0,56% – 8,13%, pri čemu su gubici do 500 MWp instalirane snage SE do 2,92%. Porast gubitaka nakon 500 MWp je značajno brži zbog nelinearne karakteristike odbačene proizvodnje u ovisnosti o instaliranoj snazi SE. Analiza je također provedena u 1 h rezoluciji. Lange i dr. [36] su proveli proračun gubitaka na blisko udaljenim operativnim VE i SE instalirane snage 2 MW i 1 MWp u 1 min rezoluciji. Autori su pokazali da se najveći iznosi odbačene proizvodnje javljaju u travnju, svibnju i listopadu budući da je tijekom tih mjeseci zadržana relativno visoka ozračenost tijekom sunčanih dana, a vjetropotencijal je također visok. Usporedba odbačene proizvodnje pri različitim vremenskim rezolucijama nije provedena. U studiji [37] u Australiji, istražena je analiza mogućnosti proširenja postojećih VE sa SE korištenjem operativnih podataka VE (vremenska rezolucija nije navedena) i satelitskih podataka sunčevog zračenja u 1 h rezoluciji na lokacijama VE. Analiza na VE u različitim regijama u Australiji je pokazala da je postojeće VE moguće proširiti sa SE čija je instalirana snaga 25% do 50% VE, a da se pritom odbačena proizvodnja ograniči do maksimalno 5% proizvodnje SE. Korištenjem sličnog pristupa, Couto i Estanqueiro [38] su razmatrali proširenje postojećih VE u Portugalu sa SE (hibridizacija) u odnosu na proširenje s dodatnom instaliranom snagom VE (dodavanje novih VA). Međutim, autori su umjesto operativnih podataka za VE koristili brzinu vjetra dobivenu numeričkim prognostičkim modelom atmosfere s prostornom rezolucijom od 1 km, a zatim korištenjem P-v karakteristike najučestalijeg VA u Portugalu modelirali proizvodnju VE. Pokazano je da će se kod hibridizacije VE sa SE čija je instalirana snaga 50% VE odbačena proizvodnja ograničiti na 4,5% ukupne proizvodnje hibridne elektrane, u odnosu na 5-30% u

slučaju s proširenjem VE jednake instalirane snage (priključna snaga je jednaka instaliranoj snazi VE). Lindberg i Lingfors [39] su analizirali hibridizaciju 264 postojeće VE u Švedskoj sa SE i zaključili da se prosječni vjetropark može proširiti za 50% kapaciteta SE, a da pritom prosječna odbačena proizvodnja iznosi 0,75% uz pretpostavku da je priključna snaga jednaka nazivnoj snazi VE. Međutim, daljnjim proširenjem instalirane snage na 100% (instalirana snaga SE je jednaka VE) i 200% (instalirana snaga SE je dva puta veća od VE) odbačena proizvodnja se povećava na 3,0% i 17,5% (u prosjeku) zbog nelinearne karakteristike odbačene proizvodnje. Das i dr. [40] su usporedili prednosti hibridizacije u odnosu na individualne VE i SE u različitim regijama u Europi. Analiza je pokazala da se hibridizacijom može smanjiti ukupna varijabilnost i odbačena proizvodnja zbog ograničene priključne snage u odnosu na varijantu proširenja VE s dodatnim VA.

Prema izvještaju WindEurope (nekada poznata i kao Europska udruga za energiju vjetra, EWEA) [41], organizacije za promociju energije vjetra u Europi, za točniju procjenu odbačene proizvodnje preporuča se upotreba 15 min ili 10 min rezolucije proizvodnje VE i SE. Izvještaj se referira na rad [18] koji navodi iskustvo investitora s hibridne elektrane Cynog Park u Walesu. Međutim, obrazloženje za preporuke nije dano u izvještaju niti u radu [18]. S druge strane, u prethodno navedenoj literaturi koja detaljnije obrađuje odbačenu proizvodnju može se primijetiti da autori primjenjuju najčešće 1 h rezoluciju proizvodnje VE i/ili SE.

U slučaju kada se primjenjuje viša vremenska rezolucija, tj. kod primjene operativnih podataka mjerene izlazne snage u [31] i [36], autori nisu proveli usporednu analizu odbačene proizvodnje pri različitim vremenskim rezolucijama. Nadalje, sa ciljem ispitivanja utjecaja udjela VE/SE u hibridnoj elektrani ili omjera priključne/instalirane snage hibridne elektrane, autori skaliraju proizvodnju VE i SE. Skaliranje se provodi množenjem vremenskih serija VE i SE s konstantom s kojom se dobiva željeni iznos instalirane snage. Takvim skaliranjem proizvodnje zanemaruje se efekt poravnanja u VE [42]–[45] i SE [46]–[49]. Naime, zbog efekta poravnanja varijacije proizvodnje VE/SE veće instalirane snage će u stvarnosti biti manje izražene u odnosu na VE/SE manje instalirane snage. Dakle, skaliranje proizvodnje s manjih prema većim snagama uzrokovat će prenaplašene fluktuacije snage, a u suprotnom smanjenje fluktuacije, te time povećati pogrešku u procjeni odbačene proizvodnje.

Drugi izvor pogreške kod proračuna odbačene proizvodnje proizlazi iz načina modeliranja VE i SE. Na primjer, kod VE je posljedica primjene P-v karakteristike VA pri visokim rezolucijama brzine vjetra. U [50]–[53] pokazano je da će zbog inercije lopatica, sustava turbine i generatora, te kao posljedica neosjetljivosti upravljačkog sustava VA na nagle promjene smjera vjetra, fluktuacije snage VA biti značajno manje u odnosu na fluktuacije brzine vjetra. Drugim riječima, direktna primjena P-v karakteristike će uzrokovati izraženije oscilacije snage VA u području viših frekvencija, koje u stvarnosti neće postojati. Analogno vrijedi i kod pretvorbe sunčevog zračenja u snagu SE primjenom modela SE koji nisu namijenjeni za visoke vremenske rezolucije, odnosno pretpostavljaju linearnu ovisnost snage SE o efektivnom zračenju na FN module u cijelom frekvencijskom rasponu. U tom pogledu, autori su u [48], [49], [54] predložili modele SE koji se mogu primjenjivati kod visokih vremenskih rezolucija, tj. za pretvorbu sunčevog zračenja u snagu SE. Primijenjeni model, tzv. *wavelet variability model* objavljen u radovima [49], [54] je kasnije i potvrđen mjerenjima [55]. Međutim, slični modeli za VE nisu razvijeni. Bilo da je riječ o skaliranju proizvodnje ili primijenjenom modelu VE/SE, pogreška je očita samo kod primjene visokih vremenskih rezolucija, dok će kod primjene npr. 1 h prosjeka ista biti znatno manje izražena ili beznačajna.

Iz prethodnih radova koji obrađuju odbačenu proizvodnju u hibridnim elektranama zaključuje se da niti u jednom radu odbačena proizvodnja nije obrađena primjenom različitih vremenskih rezolucija. Nadalje, analiza odbačene proizvodnje pri visokim vremenskim rezolucijama zahtjeva sustavnu promjenu modela hibridne elektrane, budući da je potrebno uvažavanje efekata koji nisu prisutni kod primjene standardiziranih nižih vremenskih rezolucija (1 h i 15 min podaci).

1.3 Ciljevi i svrha znanstvenog istraživanja

Svrha istraživanja u sklopu ove disertacije je produbiti razumijevanje o odbačenoj proizvodnji u hibridnim elektranama, sastavljenim od vjetroelektrane i sunčane elektrane, u uvjetima ograničene priključne snage. Dosadašnja literatura pokazuje nedostatak detaljnih analiza odbačene proizvodnje u hibridnim elektranama, stoga je specifični naglasak stavljen na analizu odbačene proizvodnje pri visokim vremenskim rezolucijama i modeliranje hibridne elektrane, a glavni ciljevi istraživanja uključuju:

1. Analizirati odbačenu proizvodnju pri različitim vremenskim rezolucijama s posebnim osvrtom na visoke vremenske rezolucije i usporedbu rezultata s nižim vremenskim rezolucijama koje se tipično koriste za evaluaciju odbačene proizvodnje u hibridnim elektranama.
2. Ispitati utjecaj omjera vršne/priključne snage, instalirane snage VE/SE u hibridnoj elektrani i veličine VE i SE na odbačenu proizvodnju pri različitim vremenskim rezolucijama.
3. Predložiti adekvatnu vremensku rezoluciju proizvodnje VE i SE s obzirom na veličinu VE i SE, a s kojom se može postići zadovoljavajuća točnost u procjeni stvarne odbačene proizvodnje.

Analiza će se provesti prikupljanjem mjerenja radne snage VA, brzine vjetra mjerene na gondoli VA, komponenti sunčevog zračenja na piranometru i temperature zraka na termometru, a sve u 1 s vremenskoj rezoluciji tijekom perioda od jedne godine. Za potrebe analize utjecaja veličine VE i SE na odbačenu proizvodnju pri različitim vremenskim rezolucijama, razvit će se model hibridne elektrane sastavljen od modula vjetroelektrane i modula sunčane elektrane. Ovakav specijalizirani model omogućit će točniji proračun odbačene proizvodnje pri visokim vremenskim rezolucijama budući da uvažava efekt poravnanja koji je zanemaren u postojećim istraživanjima odbačene proizvodnje u literaturi.

1.4 Hipoteze

Predložene hipoteze doktorske disertacije su:

1. Pojednostavljeni modeli proizvodnje VE zasnovani na P-v karakteristici VA i primjeni skaliranja proizvodnje VA s brojem VA u VE ne mogu precizno modelirati fluktuacije snage VE u višim vremenskim rezolucijama budući da ne uzimaju u obzir dinamičke karakteristike VA i efekt poravnanja u VE. Hipoteza će se provjeriti usporedbom ostvarene proizvodnje VE i proizvodnje dobivene primjenom skaliranja instalirane snage jednog VA na instaliranu snagu VE u vremenskoj i frekvencijskoj domeni.
2. Primjenom matematičkog modela VE koji polazi od proizvodnje jednog ili više reprezentativnih VA, moguće je preciznije modelirati proizvodnju VE u visokim vremenskim rezolucijama (u odnosu na prethodni pojednostavljeni model) ako se skaliranje na veće snage provede s različitim koeficijentima prigušenja zasnovanim na teorijskim karakteristikama efekta poravnanja. Hipoteza

će se provjeriti usporedbom ostvarene proizvodnje VE i predloženim matematičkim modelom koji uvažava teorijske karakteristike efekta poravnanja ispitane na podacima jedne ili više operativnih VE u 1-sekundnoj rezoluciji, u odnosu na prethodni pojednostavljeni model.

3. Modeli proizvodnje SE zasnovani na primjeni nižih vremenskih rezolucija i implementirani u većini otvorenih i komercijalnih programskih paketa za modeliranje SE nisu prikladni kod primjene visoke vremenske rezolucije sunčevog zračenja jer pretpostavljaju linearnu proporcionalnost sunčevog zračenja i izlazne snage SE u cijelom frekvencijskom spektru. Hipoteza će se provjeriti usporedbom proizvodnje primjenom modela SE za niske vremenske rezolucije i modela SE za visoke vremenske rezolucije prema [48] i [49], dorađenih s detaljnijom razradom energetske gubitaka u SE i ograničenjem izlazne snage izmjenjivača (DC/AC omjer).
4. Korištena vremenska rezolucija izlazne snage VE i SE ima utjecaj na procjenu odbačene proizvodnje budući da se procesom usrednjavanja vremenskih serija na niže rezolucije izostavlja informacija o fluktuacijama snage VE/SE unutar intervala usrednjenja, a time zanemaruju potencijalna kratkotrajna prekoračenja priključne snage koja se neće uočiti u nižim vremenskim rezolucijama. Hipoteza će se provjeriti proračunom odbačene proizvodnje u hibridnoj elektrani za odabrani omjer priključne/instalirane snage i jednaki omjer instalirane snage VE/SE primjenom različitih vremenskih rezolucija snage VE i SE. Različiti setovi vremenskih serija proizvodnje pri odgovarajućim vremenskim rezolucijama kreirani će se usrednjavanjem visoke vremenske rezolucije primjenom razvijenih modela VE i SE.
5. Povećanje instalirane snage VE i SE (veći broj i/ili nazivna snaga VA kod VE i veća površina FN modula kod SE) uzrokovat će smanjenje unutar-satnih fluktuacija snage, što će se kod zadržanog omjera priključne/instalirane snage odraziti na smanjenje dodatne odbačene proizvodnje između različitih vremenskih rezolucija. Hipoteza će se provjeriti proračunom odbačene proizvodnje na hibridnim elektranama različite instalirane snage pri odabranim vremenskim rezolucijama, ali s fiksnim omjerom priključne/instalirane snage i jednakim omjerom instalirane snage VE/SE.

1.5 Struktura disertacije

Doktorska disertacija se sastoji od ukupno osam poglavlja i tri priloga. U drugom poglavlju opisan je teorijski uvod u modeliranje vjetroelektrana i sunčanih elektrana. Ovakvi modeli VE i SE nazivaju se i klasični modeli kod kojih se pretvorba iz vjetra u proizvodnju VE i komponenti sunčevog zračenja u proizvodnju SE provodi bez uvažavanja efekta poravnanja.

U trećem poglavlju opisani su osnovni aspekti hibridnih elektrana sastavljenih od vjetroelektrane i sunčane elektrane. Opisane su topologije hibridnih elektrana i upravljački sustavi, komplementarnost proizvodnje vjetroelektrana i sunčanih elektrana, te problematika vezana za ograničenje priključne snage. Što se tiče ograničenja priključne snage, iznosi se formalna definicija odbačene proizvodnje u hibridnim elektranama, problematika procjene odbačene proizvodnje s obzirom na korištenu vremensku rezoluciju i ograničenje priključne snage s obzirom na odziv upravljačkog sustava. Ograničenje priključne snage analizira se na primjeru mjerenja radne snage u 10 ms rezoluciji na mjestu priključka tijekom testiranja vjetroelektrane prije puštanja u pogon.

U četvrtom poglavlju analiza se odbačena proizvodnja u hibridnim elektranama pri nižim vremenskim rezolucijama. S obzirom da se koriste niže vremenske rezolucije, zanemaruje se efekt poravnanja u VE i SE, a modeliranje VE i SE provodi se korištenjem klasičnih modela objašnjenih u poglavlju 2. Analiza odbačene proizvodnje provedena je korištenjem proširenog desetgodišnjeg perioda mjerenih podataka VE s mjernih stupova na planiranoj lokaciji VE i satelitskih podataka sunčevog zračenja za isti period.

U petom poglavlju analizira se efekt poravnanja u VE i SE u vremenskoj i frekvencijskoj domeni, te istovremeno u vremensko-frekvencijskoj domeni primjenom wavelet transformacije. Nadalje, razvijen je model hibridne elektrane visoke vremenske rezolucije koji se sastoji od modula za proizvodnju vjetroelektrane i modula sunčane elektrane. Predloženi modul vjetroelektrane zasnovan je na matematičkom modelu primjenom metode maksimalnog preklapanja diskretne wavelet transformacije i multirezolucijske analize. Valjanost modula VE provjerena je u vremenskoj i frekvencijskoj domeni usporedbenom s ostvarenom proizvodnjom i pojednostavljenim modelom VE zasnovanim na skaliranju proizvodnje VE s brojem VA. Predloženi modul SE zasnovan je na postojećim modelima koji su unaprjeđeni i prilagođeni za topologiju hibridne elektrane većih instaliranih snaga.

Analiza odbačene proizvodnje kod viših vremenskih rezolucija provedena je u šestom poglavlju. Za analizu korišteni su operativni podaci u 1 s rezoluciji tijekom cijele godine, a koji uključuju radnu snagu i brzinu vjetra mjerenu na gondoli svih VA u VE čija je instalirana snaga približno 49 MW. Također, podaci uključuju i mjerenja sunčevog zračenja (GHI, DHI) na piranometru i temperaturu zraka na termometru za isti period u kojem su prikupljeni podaci za VE, pri čemu je lokacija mjerenja sunčevog zračenja udaljena cca 125 km u odnosu na lokaciju VE. Odbačena proizvodnja analizirana je primjenom različitih vremenskih rezolucija, od 1 s do 1 h, primjenom modela hibridne elektrane razvijenog u sklopu petog poglavlja. Nadalje, odbačena proizvodnja je analizirana s obzirom na veličinu VE i SE (utjecaj promjene instalirane snage na efekt poravnanja), omjer priključne i instalirane snage i udio VE i SE u hibridnoj elektrani.

U sedmom poglavlju iznesen je pregled znanstvenih doprinosa rada.

U posljednjem osmom poglavlju iznesen je zaključak disertacije s obzirom na dobivene rezultate i smjernice za daljnji istraživački rad.

2. UVOD U MODELIRANJE VJETROELEKTRANA I SUNČANIH ELEKTRANA

2.1 Modeliranje vjetroelektrane

Modeliranje vjetroelektrana je ključno za optimizaciju i efikasno iskorištavanje energije vjetra. Unutar znanstvene i stručne literaturi moguće je pronaći različite modele VE, a ovisno o predmetu rada modeli mogu biti pojednostavljeni ili sofisticirani.

Kada se primjenjuju sofisticiraniji modeli VE, bitan naglasak stavlja se na prikupljanje podataka o vjetru tijekom duljih vremenskih perioda, analizu kompleksnosti i svojstava terena, uvažavanje zavjetrinskih efekata i optimizaciju smještaja VA. Međutim, u znanstvenoj literaturi ponekad se koriste i pojednostavljeni modeli VE zasnovani na pretvorbi brzine vjetra u proizvodnju VA korištenjem P-v karakteristike, te skaliranjem na nazivnu snagu VE uz korekciju s gubicima u VE. Kod takvih modela zanemaruju se karakteristike terena, smještaj VA, a gubici se procjenjuju iskustveno ili ponekad potpuno zanemaruju. Pojednostavljeni modeli često su izbor kada su informacije o brzini vjetra ograničene ili kada model VE nema značajnog utjecaja na ključne rezultate analize.

2.1.1 Varijabilnost vjetra na lokaciji

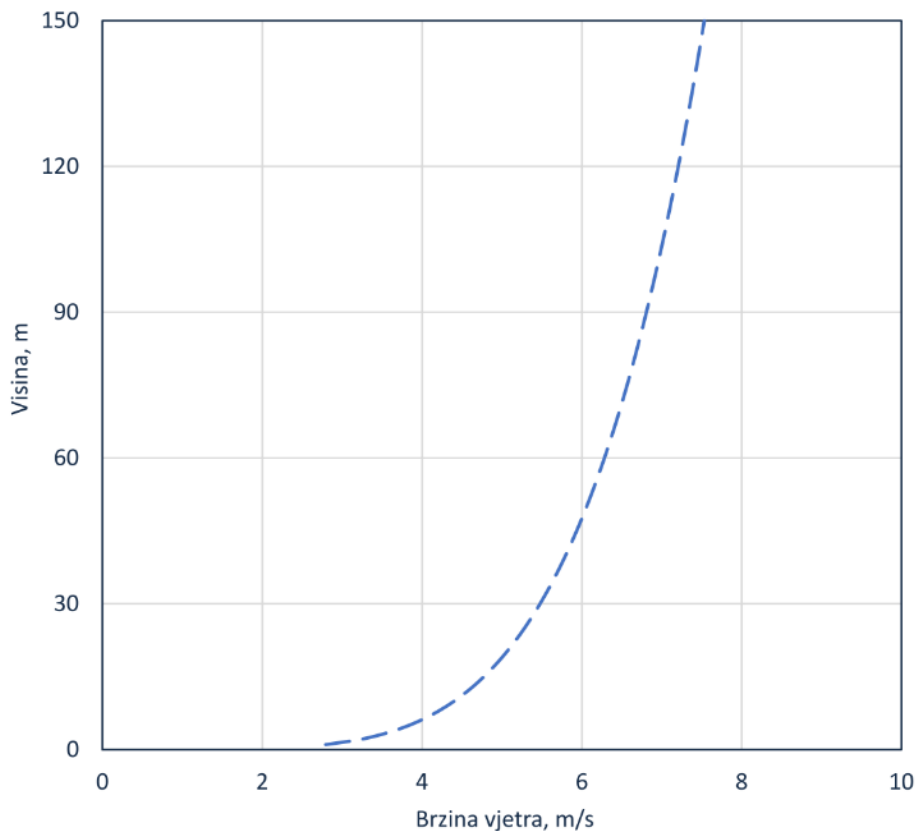
Vjetar predstavlja horizontalno strujanje zraka koje je posljedica neravnomjernog zagrijavanja Zemlje zbog sunčevog zračenja, a karakteriziran je brzinom, smjerom i intenzitetom turbulencija. Vremenske varijacije vjetra obilježene su u različitim vremenskim skalama, od međugodišnjih, sezonskih, dnevnih i kratkoročnih varijacija. U kraćim vremenskim skalama, od unutar-sekundnih do 10-minutnih intervala, fluktuacije brzine vjetra su posljedica turbulencije koja je stohastičke naravi [55, str. 30]. Intenzitet turbulencije definira se kao omjer standardne devijacije i srednje vrijednosti brzine vjetra. Na kompleksnom terenu, intenzitet turbulencija može varirati između 15% i 20%, dok se na otvorenom moru mogu očekivati manji iznosi između 10% i 14% [56, str. 6].

Brzina i smjer vjetra mjeri se na anemometrima koji se postavljaju na planiranoj lokaciji VE, redovito na različitim visinama mjernog stupa (npr. 60 m, 80 m, 100 m i 120 m). Postavljenjem anemometara na različite visine (minimalno dva) moguće je uočiti promjenu brzine vjetra s obzirom na visinu. Takva karakteristika se naziva smicanje vjetra. Promjena brzine vjetra s visinom (Slika 2-1) može se aproksimirati korištenjem zakona potencije (engl. *power law*). Uz pretpostavku da profil brzine vjetra slijedi zakon potencije, brzina vjetra na određenoj visini h_x može se dobiti poznavajući brzinu vjetra na visini h korištenjem opće poznate Hellmanove jednadžbe:

$$\frac{v_{hx}}{v_h} = \left(\frac{h_x}{h}\right)^\chi \quad (2.1)$$

gdje su:

- v_{hx} brzina vjetra na visini h_x ,
- v_h brzina vjetra na poznatoj visini h ,
- χ Hellmanov eksponent.



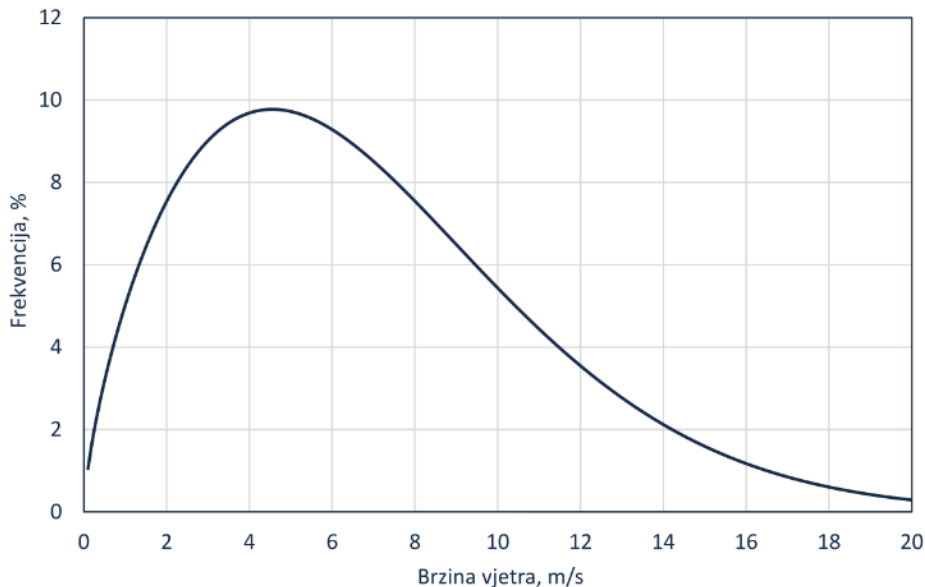
Slika 2-1 Vertikalna promjena brzine vjetra

Hellmanov eksponent može varirati u rasponu od 0,09 do 0,30 [56, str. 42], gdje su niže vrijednosti karakteristične za otvorene površine poput mora, dok se više vrijednosti javljaju kod složenijih terena poput urbanih područja.

Brzina vjetra mjerena na anemometru obično se bilježi u 10 min intervalima. Distribucija brzine vjetra se najčešće opisuje korištenjem Weibullove statističke razdiobe (Slika 2-2) opisane s dva parametra A_w i k_w [56, str. 40]:

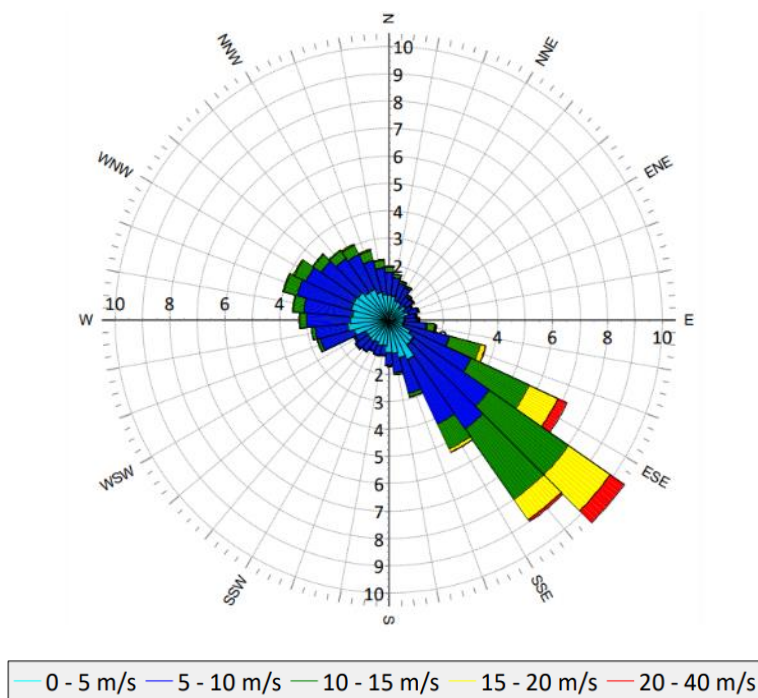
$$f(v) = \frac{k_w}{A_w} \cdot \left(\frac{v}{A_w}\right)^{k_w-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{A_w}\right)^{k_w}\right] \quad (2.2)$$

Parametar A_w je fizikalno izražen u m/s i direktno je vezan za srednju brzinu vjetra, a bezdimenzionalni parametar k_w određuje simetriju distribucije te fizikalno određuje disperziju brzine vjetra oko srednjih vrijednosti.



Slika 2-2 Primjer funkcije gustoće vjerojatnosti Weibullove razdiobe

Smjer vjetra je određen s obzirom na kut u odnosu na sjever (u rasponu od 0° do 360°). Za prikaz distribucije brzine vjetra s obzirom na smjer vjetra obično se koristi ruža vjetrova (Slika 2-3). Kompas se dijeli u određeni broj sektora (u donjem slučaju 36 sektora, svaki po 10°) s kojim se postiže tražena razlučivost, a za svaki sektor prikazuje se distribucija brzina vjetra. Na prikazanoj slici 2-3, vidljivo je da je na lokaciji dominantan vjetar iz smjera jugoistoka. Ruža vjetrova može se prikazati i korištenjem proizvodnje umjesto brzine vjetra (npr. za vjetroagregat).



Slika 2-3 Ruža vjetrova na planiranoj lokaciji VE mjerena na anemometru

Varijacije brzine vjetra direktno utječu na varijabilnost proizvodnje vjetroelektrana. Međutim, analiza varijabilnosti proizvodnje vjetroelektrana ima dodatnu razinu kompleksnosti budući da je ovisna o karakteristikama terena na kojem se nalazi, prostornom rasporedu VA, tehničkim karakteristikama VA, itd.

2.1.2 Dugoročna korekcija podataka

Proizvodnja vjetroelektrana podložna je značajnim varijacijama čiji iznos ovisi o lokaciji. U [58], autori su na temelju dugogodišnjih mjerenja u Škotskoj utvrdili da su očekivane međugodišnje varijacije proizvodnje VA obično kreću od 10% do 15% s mogućnošću znatno većih promjena u pojedinim godinama.

Kako bi se smanjio utjecaj nestandardne godine na procjenu proizvodnje, mjereni podaci vjetra se korigiraju. Dugoročna korekcija podataka na lokaciji primjenom MCP (engl. *Measure Correlate Predict*) metode koristi se za predviđanje dugoročnog ponašanja vjetra na temelju kratkoročnih mjerenja vjetra. Glavna razlika između različitih MCP metoda leži u vrsti odnosa koji se uspostavlja između podataka o vjetru (brzina i smjer) zabilježenih na ciljanoj lokaciji i podataka o vjetru istovremeno zabilježenih na jednoj ili više referentnih meteoroloških stanica u blizini [59].

Prve MCP metode korištene su za procjenu dugoročnih promjena godišnjih srednjih vrijednosti brzine vjetra [60], a kasnije su razvijeni jednostavniji linearni regresijski modeli i nedavno nelinearni modeli zasnovani na primjeni strojnog učenja korištenjem metoda poput SVR (engl. *Support Vector Regression*) ili neuronskih mreža (ANN, engl. *Artificial Neural Networks*) [60] s kojima je moguće ostvariti odnos između kraćih vremenskih intervala.

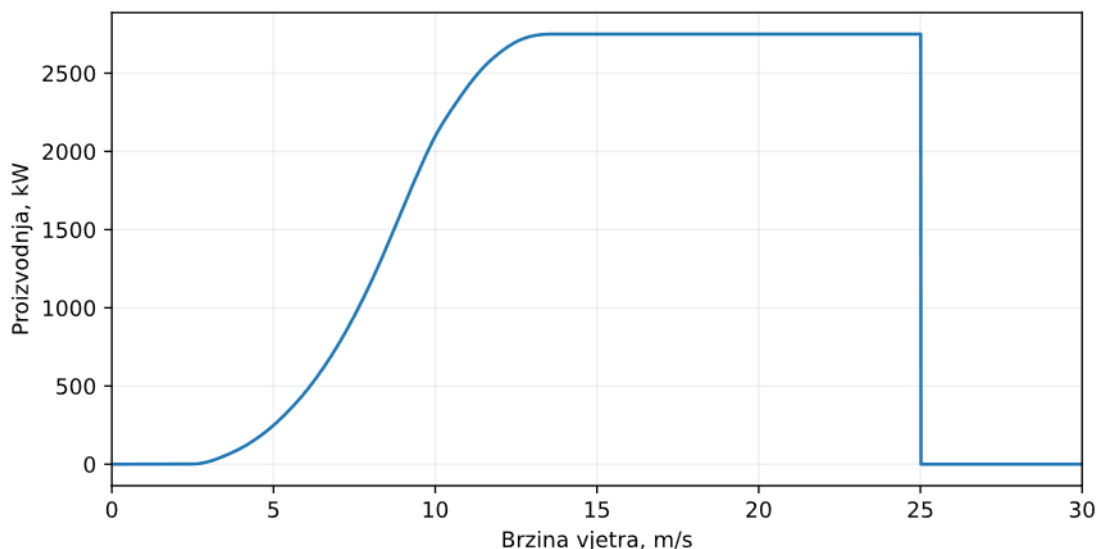
MCP procedura tijekom planiranja vjetroelektrana najčešće se sastoji od tri koraka:

1. Prikupljanje podataka brzine i smjera vjetra, intenziteta turbulencija, i drugih podataka koji se koriste tijekom procjene resursa na lokaciji VE. Prikupljeni podaci obično obuhvaćaju kraći vremenski period (npr. od jedne do tri godine).
2. Kratkoročna mjerenja se koreliraju s dugoročnim podacima koji se najčešće dobivaju korištenjem satelitskih podataka. Iako satelitski podaci ne mogu precizno obuhvatiti dnevne fluktuacije brzine vjetra, isti dobro opisuju trendove promjene tijekom duljih vremenskih intervala. Za korelaciju koriste se statističke metode, poput linearne regresije, napredne metode strojnog učenja ili neuronske mreže, pri čemu je cilj identificirati povezanost između kratkotrajnih i dugoročnih vremenskih nizova koja se može koristiti za ekstrapolaciju podataka.
3. Uspostavljena korelacija između kratkotrajnih mjerenja na lokaciji se koristi za proširenje na dulje vremenske intervale. Tako provedenim postupkom dobiva se nova dugoročna vremenska serija koja zadržava autokorelaciju kratkoročnog vremenskog niza te dugoročne promjene (varijabilnost) iz dugoročnog vremenskog niza dobivenog iz satelitskih podataka.

2.1.3 Krivulja snage vjetroagregata

Krivulja snage VA ili P-v krivulja je nelinearna funkcija ovisnosti snage VA o brzini vjetra koja se može okarakterizirati s brzinom pokretanja (brzina pri kojoj VA počinje s proizvodnjom snage), nazivnom brzinom (brzina pri kojoj VA proizvodi nazivnu snagu) i maksimalnom brzinom vjetra (brzina iznad koje se VA isključuje zbog većih mehaničkih naprezanja). U dijelu P-v krivulje između brzine pokretanja i nazivne brzine, promjena brzine može uzrokovati značajne promjene u proizvedenoj snazi, osobito u strmijem dijelu karakteristike.

Krivulja snage VA tipa General Electric 2.75-103 prikazana je na slici 2-4. P-v krivulja VA može se okarakterizirati brzinom pokretanja (engl. *cut-in speed*) $v_i=3$ m/s, nazivnom brzinom (engl. *rated speed*) cca $v_r=12,5$ m/s i maksimalnom brzinom vjetra (engl. *cut-out speed*) $v_c=25$ m/s.



Slika 2-4 P-v karakteristika vjetroagregata (VA) tipa General Electric 2.75-103

U nelinearnom dijelu $v_i < v < v_r$ proizvodnja VA može se opisati jednadžbom:

$$P_{VA} = \eta_{VA} \cdot \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho_a \cdot A_l \cdot v_{VA}^3 \quad (2.3)$$

gdje su:

C_p koeficijent snage,

ρ_a gustoća zraka,

A_l površina lopatica,

v_{VA} brzina vjetra na visini gondole,

η_{VA} ukupna korisnost VA (umnožak mehaničke i električne korisnosti).

2.1.4 Optimizacija smještaja vjetroagregata

Optimizacija smještaja VA uključuje nekoliko aspekata, od analize resursa vjetra, karakteristika terena, međusobnog utjecaja VA, ekoloških i društvenih ograničenja do analize postojeće infrastrukture i mjesta priključka na mrežu:

- Analiza resursa: procjena dominantnog smjera vjetra, brzine vjetra i intenziteta turbulencija na razmatranoj lokaciji VE.
- Procjena zavjetrinskih gubitaka: strujanje vjetra kroz VA uzrokuje tzv. wake karakteriziran smanjenjem brzine vjetra i povećanim turbulencijama nakon prolaska kroz VA, što značajno utječe na performanse VA koji su pozicionirani u zavjetrini drugih VA. Zavjetrinski gubici (WLM, engl. *wake effect losses*) čine najznačajniju sastavnicu gubitaka.

- Topografija terena: utječe na tok vjetra i uzrokuje lokalna ubrzanja i usporenja vjetra, kao i turbulencije. Karakteristike terena utječu na proizvodnju individualnih VA, kao i na efikasnost cjelokupne VE.
- Ekološka i društvena ograničenja: udaljenosti od naselja, zaštićenih životinja i kulturne baštine. Projekt VE treba imati minimalni negativni utjecaj na ekologiju i lokalno stanovništvo.

Mjesto priključka na elektroenergetsku mrežu i lokalna infrastruktura poput pristupnih cesta također ima važnu ulogu s obzirom na smještaj VA, a svi troškovi povezani s istim (troškovi izgradnje cesta, polaganja kabela ili eventualnih zahvata u mreži) se nastoje minimizirati.

U literaturi postoje brojni radovi na temu optimalnog smještaja VA u kojima je fokus stavljen na optimizaciju proizvodnje i efikasnost, pri čemu se uzimaju u obzir faktori poput brzine vjetra, zavjetrinskih gubitaka i ograničenja terena, npr. kao u [61].

2.1.5 Gubici u vjetroelektranama

2.1.5.1 Zavjetrinski gubici

Zavjetrinski gubici u vjetroelektranama odnose se na smanjenje proizvodnje vjetroelektrane zbog međusobnog utjecaja VA. Zavjetrinski gubici se javljaju kada su vjetroatregati postavljeni na relativno bliskim međusobnim udaljenostima u smjeru strujanja vjetra, zbog čega će VA koji se nalazi u zavjetrini drugog VA imati smanjene performanse. Izračun zavjetrinskih gubitaka je vrlo važan budući da isti čine najizraženiju sastavnicu gubitaka u VE.

Za analizu zavjetrinskih gubitaka od interesa su dvije važne posljedice [62]:

- smanjenje brzine vjetra iza razmatranog vjetroatregata koje uzrokuje smanjenje proizvodnje u vjetroatregatu smještenom u zavjetrini i
- povećanje turbulencija koje uzrokuju povećanja opterećenja pri radu VA.

Zavjetrinski gubici se mogu analizirati u bliskoj i udaljenoj zavjetrini. Bliska zavjetrina obuhvaća područje iza turbine i proteže se do otprilike 2 – 4 promjera lopatica [63], značajno ovisi o geometriji lopatica i karakterizirana je strmim gradijentima tlaka [62]. U dalekoj zavjetrini, efekti rotora nemaju bitnog utjecaja, a područje je karakterizirano smanjenom brzinom vjetra i povećanim intenzitetom turbulencija [62].

Učinak ovog efekta ovisi o brojnim parametrima, poput udaljenosti između VA, smjeru i brzini vjetra, dimenzijama lopatica i karakteristikama terena. Za procjenu zavjetrinskih gubitaka koriste se modeli koji se mogu podijeliti u dvije kategorije [64]:

1. Analitički
2. Modeli zasnovani na računalnoj dinamici fluida (CFD, engl. *Computational Fluid Dynamics*)

Od analitičkih modela najzastupljeniji je Jensenov model [65], [66] zbog svoje jednostavnosti i praktičnosti, a koji predstavlja jednadžbu za deficit brzine vjetra u zavjetrini vjetroturbine. Modeli zasnovani na CFD-u predstavljaju vrlo sofisticirane modele, a zasnovani su na rješavanju Navier-Stokes jednadžbi. Neki od najčešće korištenih modela su EVM (engl. *Eddy Viscosity Model*), DWM (engl. *Dynamic Wake Meander*) i LES (engl. *Large Eddy Simulation*), gdje potonji zahtjeva vrlo visoke računalne resurse [64]. Razvijeni su i

hibridni modeli kao kombinacija više različitih pristupa modeliranja, a predstavljaju kompromis između preciznosti i računalne kompleksnosti.

S obzirom da su mjerenja brzine i smjera vjetra dostupna najčešće na jednom mjernom stupu (jednoj točki u prostoru), radi se ekstrapolacija brzine vjetra na različite točke u prostoru (gdje su locirani VA) primjenom neke od prethodnih metoda. Način ekstrapolacije bitno ovisi o kompleksnosti i svojstvima terena, ali i pozicijama VA zbog međusobnog utjecaja VA.

2.1.5.2 Ostale sastavnice gubitaka

Uzimajući u obzir definirani smještaj VA, proračunate brzine vjetra na visini gondole VA (uvažavajući zavjetrinske gubitke i turbulencije) te krivulju snage VA, može se procijeniti proizvodnja VE. Uz zavjetrinske gubitke, koji imaju dominantni udio u ukupnim gubicima, potrebno je uzeti u obzir i druge sastavnice gubitaka poput:

- gubitaka neraspoloživosti VA, cijele VE i mreže,
- gubitaka podbačaja,
- električnih gubitaka u internoj kabelskoj mreži VE i transformatorima,
- itd.

Pod gubicima podbačaja podrazumijeva se manjak proizvodnje vjetroagregata u odnosu na očekivanu proizvodnju za dane vjetro potencijale. Proizvodnja VE može se dobiti zbrajanjem vremenskih serija pojedinačnih VA, uz naknadno uvažavanje ostalih sastavnica gubitaka:

$$P_{VE} = \eta_{VE} \cdot \sum_i P_{VA,i} \quad (2.4)$$

gdje je η_{VE} ukupna efikasnost VE koja uključuje ostale sastavnice gubitaka u VE.

Kada vremenske serije individualnih VA nisu poznate, proizvodnja VE može se pojednostavljeno dobiti množenjem P-v karakteristike VA s ukupnim brojem VA i ukupnom efikasnosti VE:

$$P_{VE} = \eta_{VE} \cdot N_{VA} \cdot P_{VA} \quad (2.5)$$

2.2 Modeliranje sunčane elektrane

Pristup modeliranju proizvodnje SE je sličan kao i kod VE, ali s različitom fizikalnom podlogom. Sama procjena proizvodnje SE je nešto jednostavnija u odnosu na VE. Procedura za modeliranje proizvodnje SE može se okvirno podijeliti na sljedeće korake:

- prikupljanje podataka sunčevog zračenja, temperature zraka i brzine vjetra na lokaciji,
- proračun ukupnog sunčevog zračenja pod kutem FN modula (POA) iz horizontalnih komponenti sunčevog zračenja,
- proračun DC snage (proizvodnje FN modula) iz ukupnog sunčevog zračenja,
- izračun gubitaka na DC strani, u DC/AC pretvorbi (izmjenjivaču) i na AC strani.

Podaci sunčevog zračenja mjere se na piranometru tijekom duljih perioda. Mjeri se najčešće globalno horizontalno zračenje (GHI, engl. *Global Horizontal Irradiance*) i difuzno horizontalno zračenje (DHI, engl. *Diffuse Horizontal Irradiance*), a direktno normalno zračenje (DNI, engl. *Direct Normal Irradiance*) se računa na temelju preostalih poznatih komponenti.

Model SE u nastavku odnosi se na SE sa fiksnom konstrukcijom te na monofacijalne FN module. Za konstrukcije s jednoosnim praćenjem i bifacijalnim modulima pojedini koraci koji se odnose na proizvodnju FN modula se razlikuju, ali preostali postupci izračuna ostaju nepromijenjeni.

2.2.1 Komponente sunčevog zračenja

Varijacije proizvodnje sunčanih elektrana posljedica su promjene ozračenosti FN modula. Ozračenost se mijenja na dnevnoj i godišnjoj razini, različita je na pojedinim dijelovima Zemlje i ovisi o klimatskim uvjetima područja [66, str. 11]. Sunčevo zračenje mjereno na vrhu Zemljine atmosfere naziva se ekstraterestičko zračenje, a primarno ovisi o udaljenosti između Zemlje i Sunca te je lako određeno matematičkim zakonitostima.

S druge strane, sunčevo zračenje koje upada na zemljinu površinu nije trivijalno odrediti zbog kompleksnosti atmosfere i njenog utjecaja na sunčeve zrake. Zemljina atmosfera je sastavljena od ozona, kisika, vodene pare i ugljičnog dioksida koji se ponašaju kao filter za sunčeve zrake [68]. Nailaskom na čestice u atmosferi, sunčeve zrake se raspršuju (promjena smjera sunčevih zraka) i apsorbiraju, a na manjim visinama nailaskom na oblake potom se dalje reduciraju (opet zbog raspršenja i apsorpcije) [68]. Stoga, dio sunčevih zraka ne dopijeva na zemljinu površinu u izvornom smjeru, već kao difuzno ili raspršeno zračenje. S obzirom na ovu dinamiku, sunčevo zračenje se obično razlaže u tri komponente:

1. Globalno horizontalno zračenje – ukupno zračenje koje upada na horizontalnu jediničnu površinu.
2. Direktno normalno zračenje – udio zračenja na jediničnu površinu koja je uvijek okomita na upadne sunčeve zrake.
3. Difuzno horizontalno zračenje – udio zračenja na jediničnu horizontalnu površinu koji ne dolazi direktnim putem, već se reflektira od oblaka ili drugih čestica u atmosferi.

Budući da se DNI mjeri na plohi koja nije u ravnini sa horizontalnom plohom (GHI i DHI), potrebno je projicirati DNI na horizontalnu plohu. Komponente sunčevog zračenja su međusobno zavisne. Veza između prethodno spomenutih komponenti sunčevog zračenja može se raspisati kao:

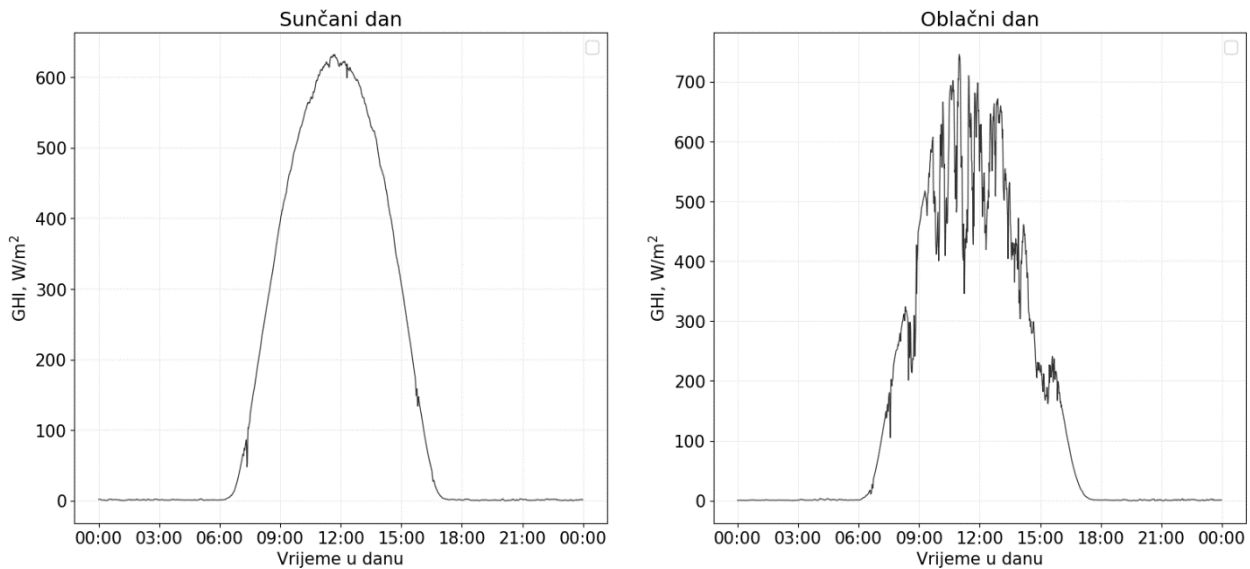
$$GHI = DNI \cdot \cos(\theta) + DHI \quad (2.6)$$

gdje je:

θ kut između upadnih zraka sunčevog zračenja i okomice na horizontalnu površinu (kut je 0° ako je Sunce direktno iznad površine i 90° ako je u ravnini s horizontalnom površinom)

U gornjem izrazu, $DNI \cdot \cos(\theta)$ predstavlja projekciju sunčevih zraka na horizontalnu plohu.

Globalno horizontalno zračenje mjereno u 1 min rezoluciji prikazano je na slici 2-5 tijekom sunčanog i djelomično oblačnog dana. Primjetno je da su fluktuacije sunčevog zračenja tijekom dana bez naoblake praktično beznačajne. Međutim, tijekom naoblake mjerni senzor će se zasjeniti što će uzrokovati fluktuacije u mjerenom zračenju.



Slika 2-5 Globalno horizontalno zračenje (GHI) tijekom sunčanog dana i tijekom dana s parcijalnom naoblakom – mjereno u 1 min rezoluciji

Sunčevo zračenje može se razmatrati na horizontalnoj površini ili na zakrenutoj površini. Za potrebe proračuna proizvodnje FN modula važno je izračunati ukupno zračenja na zakrenutoj površini budući da se FN moduli postavljaju pod odgovarajućim kutem nagiba u odnosu na horizontalnu. Tipično, kut nagiba FN modula odabire se između $10^\circ - 30^\circ$ kako bi se povećala proizvodnja FN modula. Optimalna orijentacija FN modula je u smjeru juga u sjevernoj hemisferi. Pretvorba iz horizontalnih komponenti u komponente sunčevog zračenja pod kutem FN modula objašnjena je u potpoglavlju 2.2.2.

Komponente sunčevog zračenja u ravnini FN modula (ili općenito zakrivljenoj plohi) mogu se podijeliti na:

- direktno zračenje (engl. *beam irradiance*), I_{beam} ,
- difuzno zračenje uslijed refleksije od oblaka ili čestica u atmosferi (engl. *diffuse irradiance*), I_{diff} ,
- reflektirano zračenje koje se odbija od tla ili susjednih objekata i upada okomito na površinu modula (engl. *reflected irradiance*), I_{refl} .

Ukupno zračenje koje upada na jedinicu površine FN modula (pod odgovarajućim nagibom) dobiva se zbrojem gornjih komponenti. Za ukupno zračenje, *POA* (engl. *plane-of-array irradiance*) dakle vrijedi:

$$POA = I_{beam} + I_{diff} + I_{refl} \quad (2.7)$$

Komponente sunčevog zračenja u ravnini FN modula mogu se dobiti iz horizontalnih komponenti. Pregled metoda za pretvorbu komponenti GHI, DNI i DHI u POA opisan je u [69].

Za mjerenje komponenti sunčevog zračenja koriste se piranometri koji mogu biti pozicionirani u horizontalnom ili zakrivljenom položaju. Kada su položeni horizontalno, piranometri mjere GHI i DHI, a ponekad i samo GHI. Jasno je da je mjerenje svih triju komponenti sunčevog zračenja redundantno jer se iz jednadžbe (2.6) treća komponenta može dobiti ako se poznaju druge dvije komponente. U slučaju kada se mjeri samo GHI, potrebna je primjena separacijskih modela (odgovarajući analitički izrazi) za određivanje druge komponente sunčevog zračenja (npr. DNI). Pregled radova u kojem su obrađeni separacijski modeli za procjenu DNI iz GHI obrađen je u [70]. Ponekad se piranometri smještaju pod odgovarajućim kutem u kojem će se postaviti FN moduli. Prednost direktnog mjerenja komponenti

sunčevog zračenja pod kutem FN modula je što nije potrebno naknadno preračunavanje iz horizontalnih komponenti sunčevog zračenja.

2.2.2 Preračunavanja horizontalnih komponenti sunčevog zračenja pod kutem FN modula

Proračun horizontalnih komponenti sunčevog zračenja u komponente pod kutem FN modula sastoji se od pojedinačnih pretvorbi DNI u direktno zračenje I_{beam} , GHI u raspršeno zračenje I_{diff} i izračun reflektiranog zračenja I_{refl} . Izračun direktnog zračenja iz DNI je jednostavan postupak koji zahtjeva geometrijsku transformaciju:

$$I_{beam} = DNI \cdot \cos(AOI) \quad (2.8)$$

gdje je AOI (engl. *Angle of Incidence*) upadni kut sunčevih zraka na FN module. Upadni kut sunčevih zraka predstavlja kut između vektora sunčevih zraka i normale na površinu FN modula.

Najsloženiji postupak u pretvorbi je izračun raspršenog zračenja I_{diff} [68]. Prvi i najjednostavniji model, tzv. izotropski model [71] tretira nebo kao jedini izvor difuznog zračenja. Difuzno zračenje na zakošenu plohu računa se preko DHI-a i kuta nagiba površine:

$$I_{diff} = DHI \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (2.9)$$

gdje je β kut nagiba modula u odnosu na horizontalu. Nedavnim ispitivanjima pokazano je da izotropski model rezultira većom pogreškom u odnosu na sofisticiranije metode [69]. Sofisticiranije metode uključuju modele [72]–[76], a najčešće se upotrebljava Perezov model [76] koji u difuznu komponentu zračenja uključuje izotropsku, cirkumsolarnu (rezultat raspršenja sunčevog zračenja) i komponentu prosvjetljivanja horizonta koja je koncentrirana u pojasu blizu horizonta. Perezov model, iako računalno najzahtjevniji, općenito daje preciznije rezultate u odnosu na druge metode [69] zbog čega se i redovito primjenjuje. Perezov model se koristi kao standardni model u programskom paketu PVSyst [77].

Jedan dio zračenja posljedica je odbijanja (refleksije) od tla, vodenih površina ili susjednih objekata. Reflektirano zračenje računa se preko GHI-a, albedo koeficijenta α i kuta nagiba FN modula:

$$I_{refl} = GHI \cdot \alpha \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (2.10)$$

Albedo koeficijent ovisi o svojstvima podloge od koje se sunčeve zrake reflektiraju. Vrijednost koeficijenta kreće se u rasponu od 0 (potpuno crno tijelo) do 1 (potpuno bijelo tijelo).

Poznavanjem pojedinačnih komponenti sunčevog zračenja, računa se ukupno zračenje na zakošenu plohu prema jednadžbi (2.7). Ukupno zračenje na zakošenu plohu, POA, zapravo nije stvarno zračenje koji dobivaju sunčeve ćelije. Stoga se uvodi pojam efektivnog zračenja I_{ef} , tj. sunčevog zračenja koje dobivaju ćelije u FN modulima nakon što se od ukupnog zračenja POA odbiju gubici zbog zasjenjenja, optički gubici zbog upadnog kuta sunčevih zraka (IAM, engl. *Incidence Angle Modifier*) i nečistoće modula (engl. *soiling loss*) [78].

2.2.3 Proračun DC snage

Proračunom efektivnog zračenja na FN module dobiva se osnova za izračun DC snage sunčane elektrane. DC snaga koja se računa ovisi o ukupnoj površini zahvaćenih modula, efikasnosti FN modula i efektivnom zračenju:

$$P_{dc} = \eta_{FN} \cdot S \cdot I_{ef} \quad (2.11)$$

gdje je S površina koju prekrivaju FN moduli, a ista se dobiva iz ukupnog broja FN modula N_{FN} u SE i površine jednog FN modula S_1 :

$$S = N_{FN} \cdot S_1 \quad (2.12)$$

Temperaturni utjecaj na efikasnost FN modula može se uključiti primjenom sljedeće jednadžbe:

$$\eta_{FN} = \eta_{FN,STC} + \theta_T \cdot (25^\circ C - T_{panel}) \quad (2.13)$$

gdje su:

$\eta_{FN,STC}$ efikasnost FN modula pri standardnim uvjetima (STC, engl. *Standard Test Conditions*),

θ_T temperaturni koeficijent FN modula (deklariran od proizvođača),

T_{panel} temperatura FN modula.

Standardni uvjeti su uvjeti prema kojima se parametri FN modula ispituju. Oni podrazumijevaju zračenje od 1000 W/m^2 , temperaturu FN ćelija od $25^\circ C$, bez vjetra, pri optičkoj masi zraka (AM, engl. *Air Mass*) AM1,5.

Optička masa zraka je omjer stvarne duljine sunčevih zraka kroz atmosferu i najkraćeg mogućeg puta, pri čemu AM1,5 podrazumijeva upadni kut od $48,2^\circ$. Vjetar ima pozitivan utjecaj na hlađenje FN modula i time na povećanje efikasnosti FN modula. U jednadžbi (2.13) ključno je odrediti temperaturu FN modula s obzirom na temperaturu zraka, ozračenost FN modula i brzinu vjetra.

U osnovi FN ćelija ili FN modul se ponaša kao strujni izvor čija je struja ovisna o naponu na stezaljkama. FN moduli su serijski povezani u nizove (engl. *string*) koji se uvode u ulaze izmjenjivača. Upravljanje FN modulima vrši se pomoću DC/DC ispravljača (integrirani unutar izmjenjivača) koji posjeduju algoritam za praćenje maksimalne snage (MPPT, engl. *Maximum Power Point Tracking*). Cilj je MPPT-a postaviti odgovarajući napon na stezaljkama priključenih FN nizova s kojim se u svakom trenutku, s obzirom na uvjete zračenja i temperature, dobiva maksimalna proizvodnja pripadajućih nizova.

2.2.4 Energetski gubici u sunčanim elektranama

Uz zadanu konfiguraciju SE, moguće je procijeniti energetske gubitke u elektrani. Energetske gubitke moguće je podijeliti na gubitke u FN modulima, gubitke prije DC/AC pretvorbe u izmjenjivaču, gubitke u izmjenjivaču, te gubitke u AC dijelu elektrane.

Gubici u FN modulima uključuju već spomenute gubitke zbog upadnog kuta sunčevih zraka (smanjenje zračenja koje dolazi do ćelija zbog refleksije u zaštitnom staklu), onečišćenja (zaprljanost FN modula) i temperaturne gubitke u FN modulu (smanjenje/povećanje efikasnosti zbog promjene temperature FN modula). Također, gubici u modulima uključuju i degradaciju FN modula, odnosno smanjenje efikasnosti

FN modula tijekom životnog vijeka, te gubitke zbog zasjenjenja (engl. *shading losses*). Degradacija modula je linearna tijekom životnog vijeka, s iznimkom da je degradacija karakteristično veća u prvoj godini (npr. većina proizvođača garantira degradaciju ne veću od 1% do 2% u prvoj godini, te 0,5% od 1. do 25. godine). Gubici u DC sustavu prije DC/AC pretvorbe uključuju gubitke neusklađenosti FN modula (engl. *mismatch*) i omske gubitke ožičenja.

U izmjenjivaču razlikujemo gubitke tijekom rada izmjenjivača (efikasnost izmjenjivača ovisi o opterećenju) i eventualne gubitke zbog ograničenja izlazne snage izmjenjivača, koji se javljaju samo tijekom perioda kada je proizvodnja FN modula na ulazu u izmjenjivač veća od nazivne snage izmjenjivača. Potonji primarno ovisi o projektiranom odnosu instalirane snage FN modula i nazivne snage izmjenjivača, tzv. DC/AC omjeru. Smanjenje nazivne snage izmjenjivača u odnosu na DC instaliranu snagu redovito se izvodi u praktičnim primjenama kako bi se poboljšala ekonomija projekta i kompenzirali gubici zbog degradacije FN modula [79]. Gubici u izmjenjivaču tijekom rada općenito ovise o ulaznoj DC snazi te imaju nelinearnu karakteristiku, a u literaturi su razvijeni različiti tipovi modela. Prema poznatom PVWatts modelu [80], efikasnost izmjenjivača može se opisati sljedećom jednadžbom:

$$\eta_{inv} = \frac{\eta_{inv,nom}}{\eta_{inv,ref}} \left(-0,0162 \cdot \xi - \frac{0,0059}{\xi} + 0,9858 \right) \quad (2.14)$$

pri čemu je:

$$\xi = \frac{P_{inv,dc}}{P_{inv,dc0}} \quad (2.15)$$

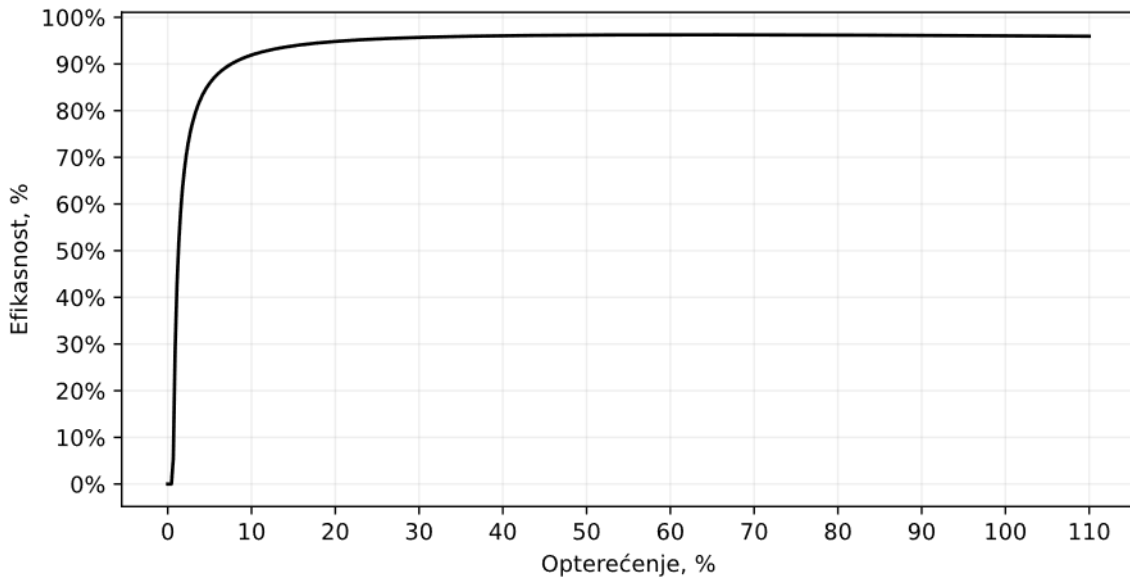
a izlazna snaga izmjenjivača dobiva se kao:

$$P_{inv,ac} = \min(\eta_{inv} P_{inv,dc}, P_{inv,ac0}) \quad (2.16)$$

Oznake u gornjim izrazima znače:

$\eta_{inv,nom}$	nazivna efikasnost izmjenjivača,
$\eta_{inv,ref}$	referentna efikasnost izmjenjivača koja je prema PVWatts modelu jednaka $\eta_{inv,ref} = 0,9637$,
$P_{inv,dc}$	DC snaga koja ulazi u izmjenjivač,
$P_{inv,dc0}; P_{inv,ac0}$	najveća dozvoljena DC odnosno AC snaga izmjenjivača, respektivno.

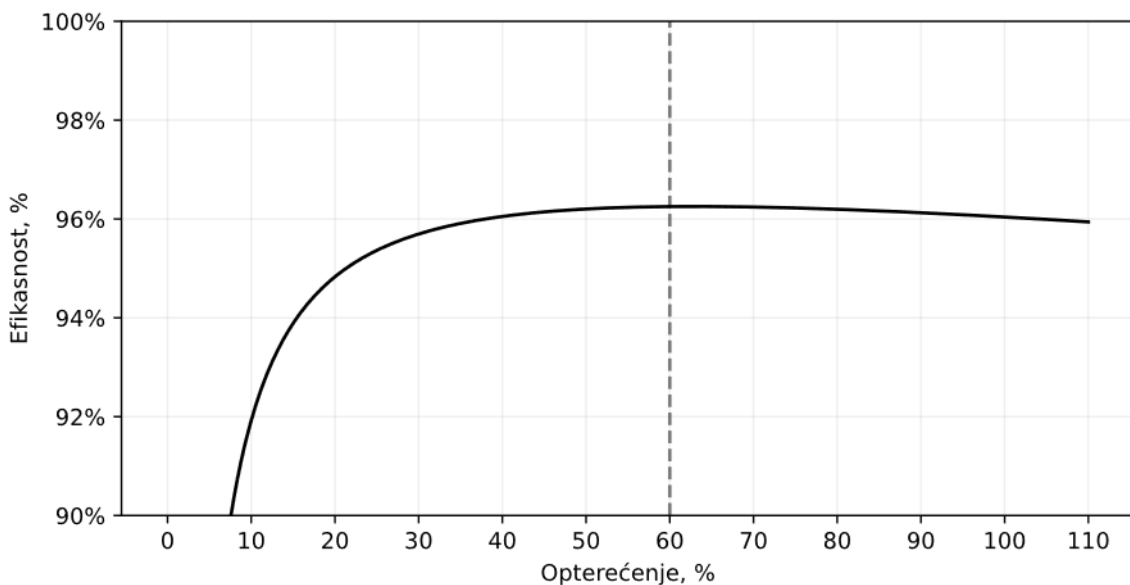
Karakteristika efikasnosti izmjenjivača, dobivena primjenom jednadžbe (2.14), uz nominalnu efikasnost izmjenjivača od 96% prikazana je na slici 2-6. Opterećenje u % na osi apscisa predstavlja ulaznu radnu snagu (npr. 0 – 110 kW) izmjenjivača dijeljenu sa maksimalnom AC snagom izmjenjivača (npr. 100 kW).



Slika 2-6 Karakteristika efikasnost izmjenjivača u ovisnosti o opterećenju

Iz karakteristike efikasnosti vidljivo je da je pri opterećenju >20%, efikasnost izmjenjivača praktično konstantna. Međutim, pri manjim opterećenjima efikasnost naglo opada, osobito za opterećenja <10%. Manja opterećenja od 10% mogu se javiti samo kod vrlo male ozračenosti FN modula, najčešće tijekom jutarnjih i večernjih sati.

Vršna efikasnost izmjenjivača u navedenom primjeru dobiva se za cca 60% opterećenja (vertikalna iscrtana linija na slici 2-7), dok je pri vršnom opterećenju efikasnost manja za cca 0,3%. S obzirom na manje varijacije efikasnosti izmjenjivača u području opterećenja 20% – 110%, efikasnost izmjenjivača često se modelira kao konstantna, tj. neovisna o opterećenju. Pad efikasnosti pri manjim opterećenjima nema energetski značajnog učinka pa se često zanemaruje.



Slika 2-7 Efikasnost izmjenjivača pri rasponu opterećenja 10% – 110%

Konačno, na AC strani SE gubici uključuju omske gubitke u NN i SN kabelskim vodovima, te gubitke u transformaciji (npr. NN/SN i SN/VN).

Ponekad se energetski gubici u SE pojednostavnjeno modeliraju pomoću omjera performansi (PR, engl. *Performance Ratio*) koji uključuje sve sastavnice gubitaka u SE [25]:

$$P_{ac} = PR \cdot \eta_{FN, stc} \cdot S \cdot I_{ef} \quad (2.17)$$

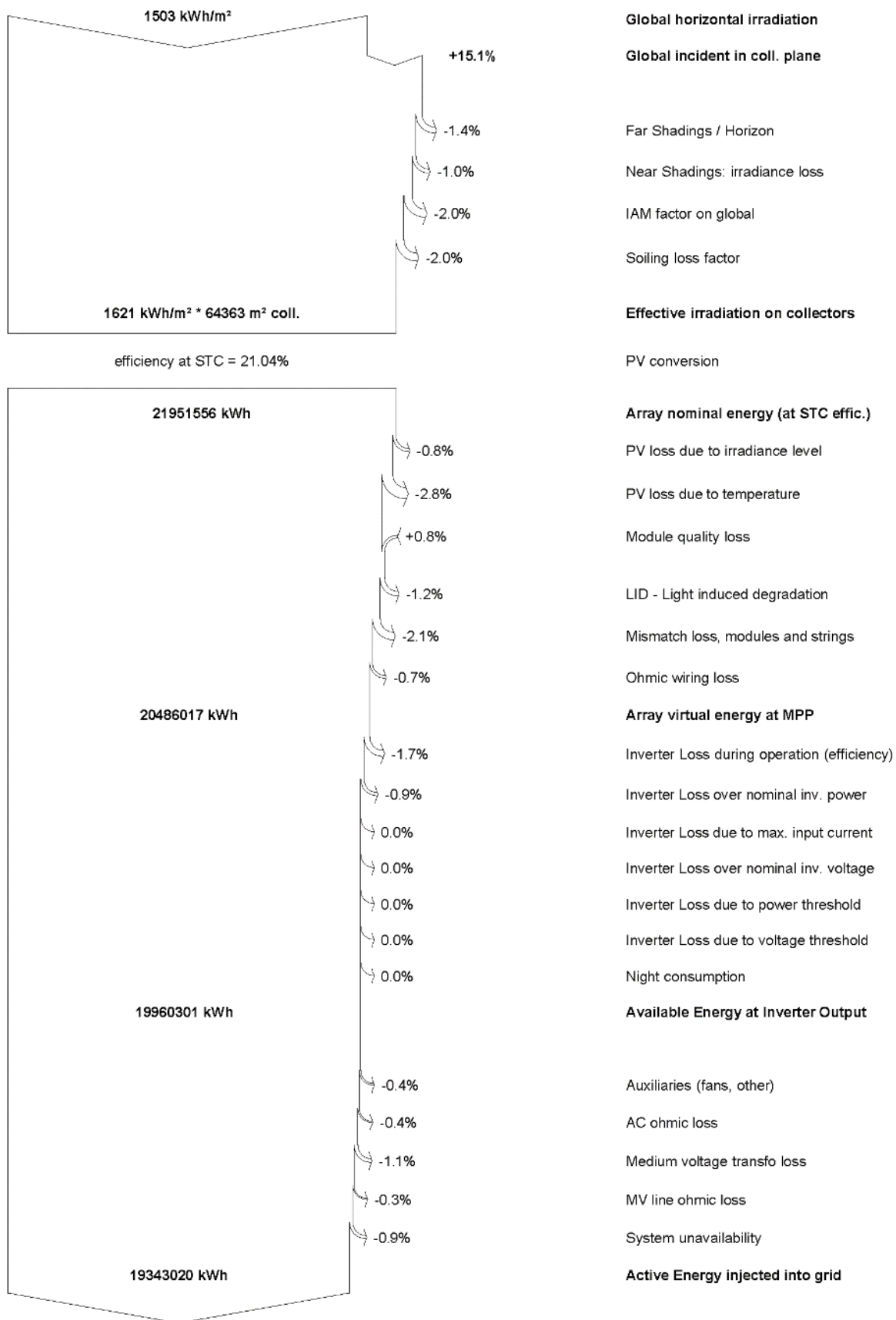
U prethodnom slučaju, temperaturni gubici se također uključuju u PR faktor, dok se u sklopu $\eta_{FN, stc}$ uključuje po definiciji samo efikasnost FN modula pri standardnim uvjetima (deklarirana od proizvođača FN modula).

Na slici 2-8 prikazan je dijagram gubitaka (bilanca) iz programskog paketa PVSyst za SE instalirane snage 13,5 MWp s fiksnom konstrukcijom. Na ulazu u bilancu nalazi se prosječna ozračenost horizontalne plohe, izražena u energiji po jedinici površine (kWh/m²). Iz iste se računa ozračenost na zakrivljenu plohu pod kutem FN modula, koja je većeg iznosa budući da će zakošena ploha primiti više sunčevog zračenja tijekom jedne godine. Prije same pretvorbe, od sunčevog zračenja na zakošenu plohu odbijaju se gubici zasjenjenja, refleksije od staklenoj sloja u modulima i gubici zbog zaprljanosti FN modula, čime se dobiva efektivno zračenje na FN module koje je osnova za izračun proizvodnje.

Ukupna proizvodnja FN modula računa se na osnovu ukupne površine modula i efikasnosti FN modula (u ovom slučaju iznosi cca 21%). Nakon dobivanja DC proizvodnje, potrebno je uvažiti sve gubitke u DC i AC sustavu kako je prethodno izneseno. PR faktor definira se iz omjera ukupne proizvodnje FN modula, koja iznosi 21,95 GWh, te izlazne snage (AC) SE 19,34 GWh. Slijedi za PR faktor:

$$PR = \frac{E_{ac}}{E_{dc}} = 88,1\% \quad (2.18)$$

Dakle, ukupni gubici u DC i AC dijelu iznose cca 11,9% za navedeni primjer.



Slika 2-8 Dijagram gubitaka iz PVSyst-a za SE instalirane snage 13,5 MWp, fiksnom konstrukcijom i monofacijalnim FN modulima

3. HIBRIDIZACIJA VJETROELEKTRANA I SUNČANIH ELEKTRANA

Hibridna elektrana u općem smislu je definirana u [41] kao postrojenje za proizvodnju energije koje pretvara primarnu energiju u električnu energiju i koje se sastoji od više od jednog modula za proizvodnju električne energije povezane na elektroenergetsku mrežu preko jedinstvenog priključnog mjesta (PCC, engl. *Point of Common Coupling*). Modul za proizvodnju električne energije je definiran Uredbom EU 2016/631 [81] i označava sinkroni modul za proizvodnju električne energije ili modul elektroenergetskog parka:

- „sinkroni modul za proizvodnju električne energije” (sinkroni proizvodni modul) znači nedjeljiv skup uređaja koji može proizvoditi električnu energiju tako da su frekvencija proizvedenog napona, brzina generatora i frekvencija mrežnog napona u stalnom omjeru i tako u sinkronizmu;
- „modul elektroenergetskog parka” znači jedinica ili skup jedinica za proizvodnju električne energije koja je nesinkrono priključena na mrežu ili povezana energetskom elektronikom te ima jedno mjesto priključenja na prijenosni sustav, distribucijski sustav, uključujući zatvoreni distribucijski sustav, ili ISVN sustav (sustav za prijenos istosmjernom strujom pri visokom naponu).

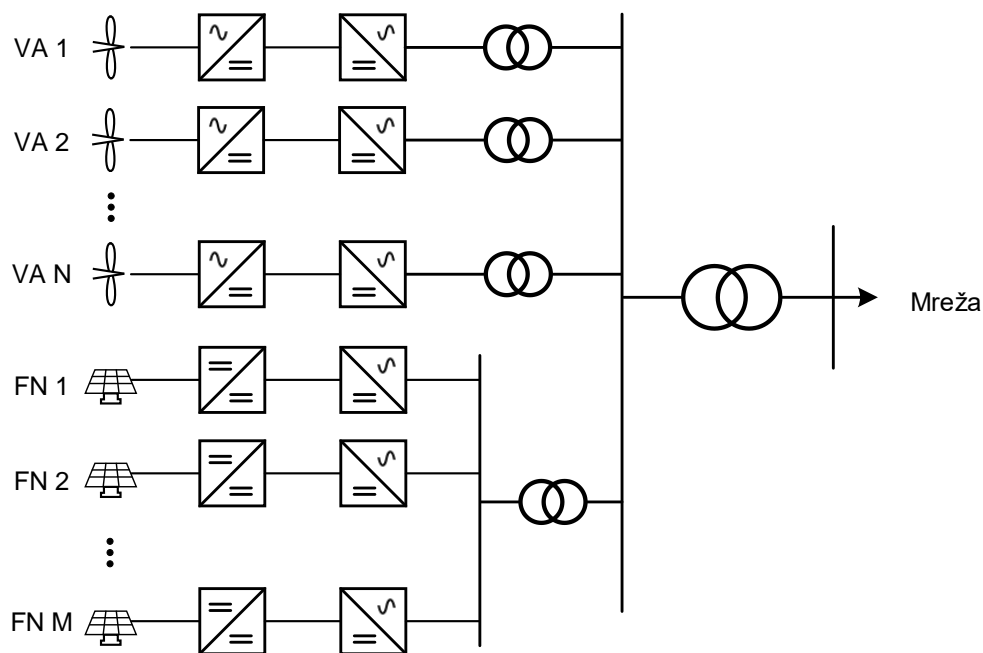
Prema [41], hibridne elektrane mogu sadržavati različite tipove sustava za pohranu energije. U daljnjem kontekstu, pojam hibridne elektrane korišten u sklopu ovog rada je sužen na vjetroelettrane i sunčane elektrane sa zajedničkim priključnim mjestom, bez sustava za pohranu energije. Također, razmatranja se isključivo odnose na veće hibridne elektrane (instalirane snage >1 MWp) s priključkom na javnu elektroenergetsku mrežu. Drugim riječima, iz razmatranja su isključeni tzv. otočni hibridni sustavi (engl. *off-grid hybrid power plants*) koji rade na vlastitoj mreži preko koje se napajaju odgovarajući potrošači. U hibridnim elektranama također postoji vlastita potrošnja, ali je njen iznos kod velikih hibridnih sustava (u odnosu na manje otočne sustave) značajno manji u odnosu na proizvodnju te se redovito isključuje iz razmatranja [82].

Motivacija za integraciju VE i SE u hibridnu elektranu proizlazi primarno iz njihovih karakteristika međusobnog nadopunjavanja odnosno komplementarnosti. Pojedinačna VE ili SE ima relativno niski faktor angažiranja zbog čega se veći dio dana ili godine ne iskorištava u potpunosti priključna snaga i komponente elektrane (kabeli, transformatori), a sa stanovišta elektroenergetske mreže zahtjeva se povećanje kapaciteta prijenosnih vodova s obzirom na vršno opterećenje koje se javlja relativno rijetko. Kombinacijom dvaju komplementarnih izvora energije, poput VE i SE, moguće je povećati instaliranu snagu iza mjesta priključka, a da se pritom poveća faktor angažiranja uz minimalno povećanje gubitaka zbog ograničene priključne snage (tzv. odbačene proizvodnje).

3.1 Topologije hibridnih elektrana i upravljanje

U literaturi se razmatraju dvije različite topologije hibridne elektrane prikazane na slikama 3-1 i 3-2. Ovakva podjela topologije primarno je motivirana razmatranjem hibridnih elektrana relativno malih instaliranih snaga. Na slici 3-1, prikazana je topologija interne mreže hibridne elektrane kod koje se VE i SE spajaju na zajedničku AC sabirnicu (engl. *AC coupled hybrid power plant*) u rasklopnom postrojenju, što je tipično za hibridne elektrane instalirane snage >1 MW/1 MWp. Ovisno o tome radi li se o priključku na srednjem ili visokom naponu, hibridna elektrana može i ne mora sadržavati i SN/VN transformator preko kojeg je

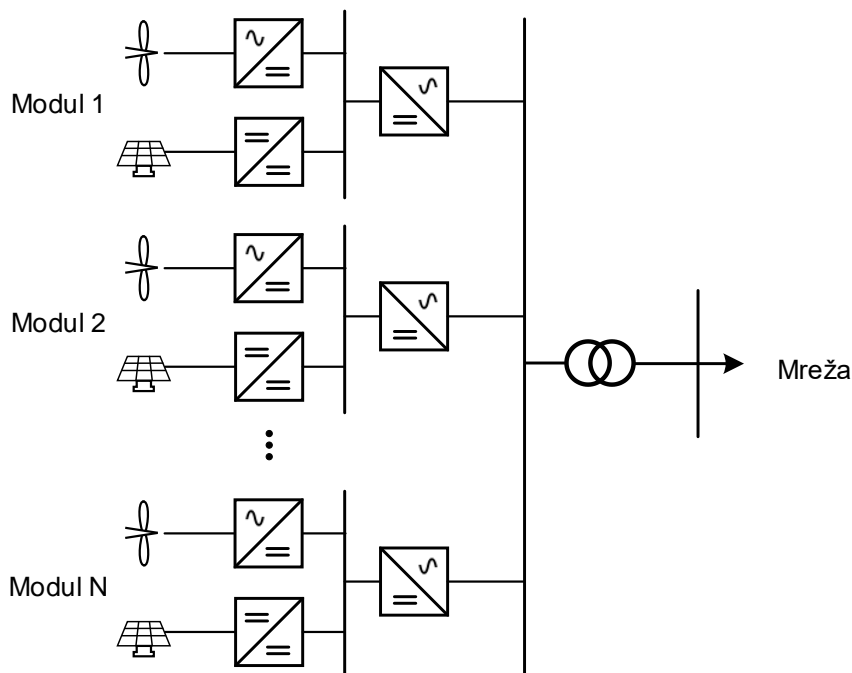
ostvaren priključak na mrežu. Prednosti ovakve topologije uključuju jednostavniju implementaciju i mogućnost korištenja kontrolera VE i SE različitih proizvođača [83].



Slika 3-1 Topologija hibridne elektrane sa zajedničkim AC sabirnicama

Druga topologija mreže prikazana na slici 3-2 može se koristiti za manje hibridne elektrane u kojima se nastoji smanjiti troškove energetske elektronike i povećati efikasnost cjelokupnog sustava. U ovoj varijanti, vjetroagregati i dijelovi FN sustava se preko individualnih AC/DC odnosno DC/DC pretvarača povezuje na zajedničku DC sabirnicu (engl. *DC coupled hybrid power plant*). Energija se isporučuje u mrežu preko zajedničkog DC/AC izmjenjivača za svaki modul. S obzirom da se ovakva topologija može primjenjivati samo kod manjih hibridnih sustava, u nastavku se neće detaljnije razmatrati.

Ukoliko se u hibridnoj elektrani planira integrirati baterijski sustav, priključak istog ostvaruje se preko odgovarajućeg izmjenjivača i transformatora na AC sabirnice u varijanti topologije sa zajedničkim AC sabirnicama, ili direktno preko DC/DC pretvarača na DC sabirnice u varijanti sa zajedničkim DC sabirnicama.



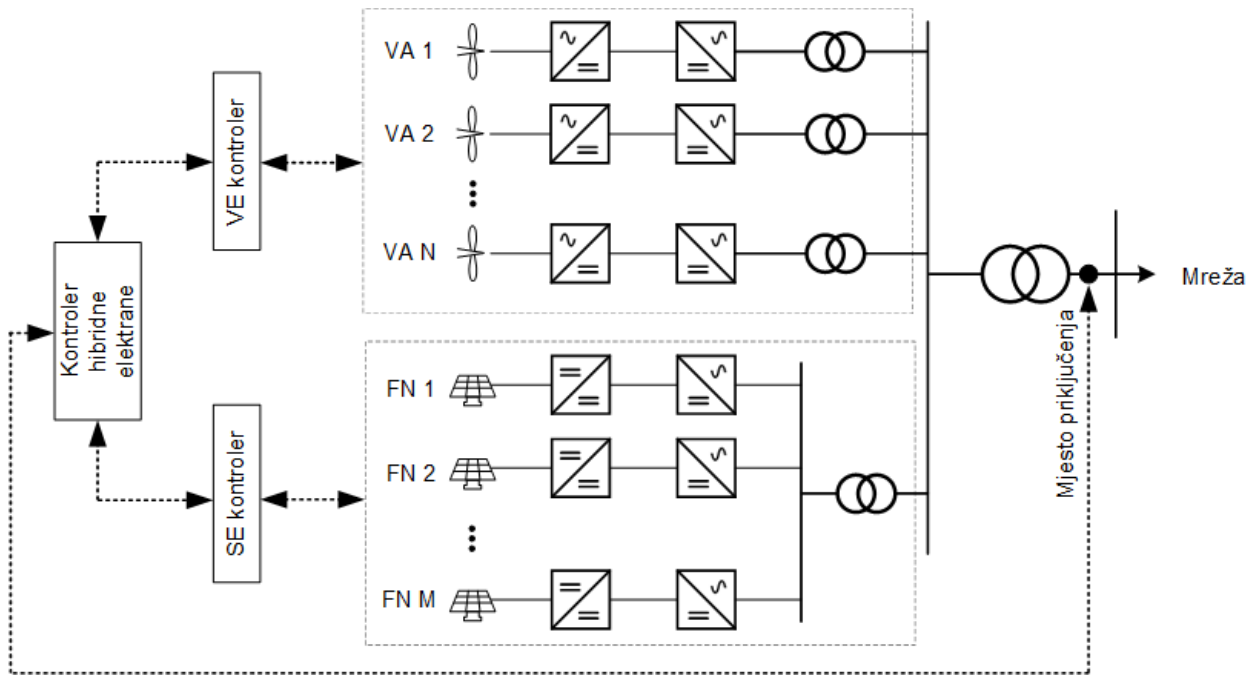
Slika 3-2 Topologija hibridne elektrane za zajedničkima DC sabirnicama

Upravljački sustav na razini hibridne elektrane također ovisi o korištenoj topologiji hibridne elektrane te o tome koristi li se sustav za pohranu energije. Upravljački sustav u varijanti topologije zajedničkih DC sabirnica zahtjeva razmjenu signala sa svakim pojedinačnim modulom te je iz istog razloga zahtjevniji, a upravljanje zahtjeva razvoj novih arhitektura i algoritama [83].

U razmatranoj topologiji mreže sa zajedničkima AC sabirnicama, upravljački sustav sastoji se od kontrolera na razini cijele hibridne elektrane (engl. *HPP controller*), te pojedinačnih kontrolera VE i SE. Ukoliko postoji, na isti način može se integrirati i kontroler sustava za pohranu energije [3]. Upravljački sustav hibridne elektrane (VE + SE) prikazan je na slici 3-3. Kontroler na razini hibridne elektrane upravlja razmjenom radne/jalove snage između hibridne elektrane i mreže:

- prima upravljačke signale od nadležnog operatera distribucijskog/prijenosnog sustava,
- dobiva mjerene podatke s mjesta priključka i osigurava da je razmjena radne i jalove snage na pragu mreže unutar dozvoljenih granica i
- dobiva raspoloživu snagu s kontrolera VE, SE (i sustava za pohranu energije ako postoji) te šalje upravljačke signale prema kontrolerima.

Upravljačka logika hibridne elektrane sastavljena od VE, SE i baterijskog sustava za pohranu energije detaljnije je obrađena u radovima [15], [83]–[85].



Slika 3-3 Upravljački sustav hibridne elektrane

3.2 Komplementarnost proizvodnje vjetroelektrana i sunčanih elektrana

Vjetroelektrane i sunčane elektrane, kao dva najzastupljenija obnovljiva izvora energije, bilježe značajan trend rasta koji je praćen tehnološkim napretkom, smanjenjem troškova i javnim poticajima. Osnovni problem VE i SE s dominantnim udjelom u ukupnoj proizvodnji OIE je njihova svojstvena varijabilnost, nepredvidljivost proizvodnje i niski faktor angažiranja. Zbog svojstvene varijabilnosti i djelomične nepredvidljivosti proizvodnje OIE, uravnoteženje elektroenergetskog sustava postaje sve složenije kako se udio OIE, osobito VE i SE, u ukupnoj proizvodnji povećava [86]. U tom kontekstu, komplementarnost energije vjetra i sunca pojavila se kao obećavajuće rješenje za rješavanje ovog problema i omogućavanje daljnje integracije varijabilnih OIE u mreži.

Komplementarnost se općenito odnosi na sinergijsku interakciju između različitih izvora energije koji mogu pomoći u osiguranju ravnoteže međusobnih fluktuacija, što dovodi do stabilnije i pouzdanije proizvodnje električne energije [87]. Komplementarnost vjetra i sunca proizlazi iz činjenice da dostupnost ovih resursa redovito pokazuje različite vremenske i prostorne ponavljajuće uzorke. Na primjer, proizvodnja SE je općenito najveća tijekom podneva, a niža u jutarnjim i kasnijim popodnevnim satima, dok je tijekom noći nedostupna. Proizvodnja VE se može pojaviti u bilo koje vrijeme, ali je redovito veća tijekom noći ili ranih jutarnjih sati. Sezonske varijacije u dostupnosti resursa također mogu pridonijeti komplementarnosti, pri čemu je proizvodnja SE veća u ljetnim mjesecima, a proizvodnja VE na većini lokacija pokazuje veći potencijal u zimskim mjesecima.

Istraživanje međusobne ovisnosti proizvodnih profila obnovljivih izvora energije važno je za efikasno planiranje rada elektroenergetskog sustava i smanjenje nepredvidljivosti proizvodnje stohastičkih izvora energije. Naime, međusobnim nadopunjavanjem proizvodnje iz OIE moguće je smanjiti ukupnu varijabilnost i potrebu za skladištenjem električne energije. Iz istog razloga, posljednjih nekoliko godina

brojni radovi posvetili su pozornost upravo problematici komplementarnosti proizvodnje VE i SE kao dominantnih obnovljivih izvora.

3.2.1 Klasifikacija komplementarnosti

Komplementarnost proizvodnje VE i SE se prema [4] može klasificirati u tri grupe:

- Vremenska komplementarnost – može se uočiti između dvaju ili više izvora električne energije na istoj lokaciji. Na primjer, proizvodnja VE je veća u zimskim periodima u odnosu na proizvodnju SE, ili obratno, proizvodnja SE je veća ljeti u odnosu na VE.
- Prostorna komplementarnost – uočava se između jednog ili više izvora električne energije na različitim lokacijama. Navedeno može uključivati komplementarnost dvije udaljene vjetroelektrane ili vjetroturbine (geografska disperzija), ali i VE u odnosu na udaljenu i blisku SE.
- Prostorno-vremenska komplementarnost – termin koji se koristi kada se komplementarnost istražuje između jednog ili više izvora električne energije istovremeno u vremenskoj i prostornoj domeni. Primjer je kada se razmatra vremenska komplementarnost na širem geografskom području.

Broj objavljenih radova na temu komplementarnosti je u značajnom porastu od 2008. godine, a trenutno je tema vrlo aktualna [4]. Komplementarnost je najviše istraživana između VE i SE, iako je često i razmatrana u kombinaciji s drugim elektranama, poput hidroelektrana ili termoelektrana [4].

Vremenska komplementarnost se promatra s obzirom na odnos fluktuacija vjetra i sunčevog zračenja tijekom vremena, a može se karakterizirati sa dnevnim i sezonskim varijacijama [88]. Dakle, vremensku komplementarnost se razmatra između elektrana na istoj ili dovoljnoj bliskoj udaljenosti pri kojoj efekti prostorne korelacije ne dolaze do izražaja (npr. unutar iste regije).

Geografska disperzija VE i SE povećava anti-korelaciju proizvodnje između elektrana, a time smanjuje varijabilnost zbirne proizvodnje VE ili SE unutar razmatranog područja. Tematika geografske disperzije odnosno efekta poravnanja proizvodnje VE ili SE s obzirom na udaljenost između elektrana obrađena je brojnim radovima, npr. [5], [43], [89]–[91].

Widen [5] je 2011. godine proveo analizu korelacije između VE i SE na području Švedske, korištenjem 8-godišnjih meteoroloških podataka u periodu 1992-1999 godine u satnoj rezoluciji. Sunčevo zračenje (globalno i difuzno zračenje) i temperatura su mjereni na 12 lokacija, dok su satelitski podaci brzine vjetra u prostornoj rezoluciji 11x11 km na 56 lokacija, sve na području Švedske. Meteorološki podaci su pretvoreni u proizvodnju VE i SE primjenom klasičnih modela. Između svih lokacija na kojima je modelirana proizvodnja VE i SE proračunat je Pearsonov koeficijent korelacije. Uočeno je da korelacija između proizvodnje dviju VE opada znatno brže s povećanjem udaljenosti, nego što je to slučaj sa SE. Kod VE, koeficijent korelacije za udaljenosti veće od 500 km pada na vrijednosti između cca +0,2 i +0,4. Međutim, kod SE se uočava određeno zasićenje s povećanjem udaljenosti, a koeficijent korelacije konvergira prema vrijednosti cca +0,8. Znatno sporije smanjenje korelacije između proizvodnje SE može se objasniti sličnim sezonskim i dnevnim profilima zračenja na svim lokacijama gdje su instalirane stanice za mjerenje sunčevog zračenja. Autor objašnjava da je između mjernih senzora sunčevog zračenja uočena visoka korelacija ekstraterestičkog zračenja na horizontalnu površinu i iznosi +0,98, a razlog smanjenja korelacije između stanica sa +1,0 na +0,8 su lokalni vremenski uvjeti.

Dok koeficijent korelacije između udaljenih VE i udaljenih SE (gledajući pojedinačno) ima snažno opadajući trend, korelacija između kombinacija VE i SE pokazuje približno konstantnu anti-korelaciju s obzirom na udaljenost, s vrlo blagim trendom prema manjim iznosima anti-korelacija kod povećane udaljenosti. Negativna korelacija (ili anti-korelacija) ukazuje na činjenicu da će na određenom području zbirne varijacije proizvodnje VE i SE biti smanjene, ali udaljenost između VE i SE ne utječe na smanjenje varijacija proizvedene snage.

Widen [5] je razmatranja prostorne korelacije ograničio do satne vremenske rezolucije. U [90] pokazano je da se povećanjem vremenske rezolucije smanjuje anti-korelacija pri istim udaljenostima u odnosu na 1 h rezoluciju. Drugim riječima, korištenjem viših vremenskih rezolucija povećava se strmina pada anti-korelacije.

3.2.2 Metrike za kvantifikaciju komplementarnosti

Procjena komplementarnosti između vjetra i sunčevog zračenja, odnosno proizvodnje VE i SE, zasniva se na upotrebi različitih metrika. U literaturi se najčešće koristi Pearsonov koeficijent korelacije [4], s kojim se kvantificira linearni odnos između dvije varijable:

$$\rho_P = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.1)$$

gdje su:

- \bar{x}, \bar{y} srednje vrijednosti varijabli x i y ,
- σ_{xy} kovarianca između varijable x i varijable y ,
- σ_x, σ_y varijance varijabli x i y ,
- n duljina vremenske serije.

Koeficijent korelacije može poprimiti vrijednost između -1 i +1, pri čemu krajnje vrijednosti od -1 i +1 označavaju savršenu negativnu korelaciju (anti-korelaciju) odnosno pozitivnu korelaciju, respektivno. Ako je koeficijent korelacije jednak nuli, dvije varijable su nekorelirane, odnosno pretpostavlja se da između njih nema povezanosti. Kada se promatra između proizvodnje VE i SE mjereno u 1 h rezoluciji, tipično se očekuju vrijednosti između +0,05 do cca. -0,2, npr. [39]. Pozitivna vrijednost koeficijenta korelacije ukazuje na veću učestalost istovremene proizvodnje VE i SE, što negativno utječe na komplementarnost. Dakle, sa stanovišta pronalaska povoljnijih lokacija za hibridne elektrane cilj je imati što manji koeficijent korelacije između vjetra i sunčevog zračenja ili proizvodnje VE i SE. Ograničavajući faktor kod primjene Pearsonovog koeficijenta korelacije je nemogućnost opisivanja nelinearne ovisnosti između varijabli.

Zato neki autori koriste Spearmanov [92] ili Kendallov koeficijent korelacije [92], [93], koji mjere razinu povezanosti rangova dvije varijable.

Spearmanov koeficijent korelacije se definira kao Pearsonov koeficijent korelacije između rangova dvije varijable:

$$r_{SP} = \rho_P(R_x, R_y) = \frac{\sigma_{R_x, R_y}}{\sigma_{R_x} \sigma_{R_y}} \quad (3.2)$$

gdje su:

R_x, R_y rangovi varijabli x i y ,

σ_{R_x, R_y} kovarijanca rangova varijabli x i y ,

$\sigma_{R_x}, \sigma_{R_y}$ varijance rangova varijabli x i y , respektivno.

Ove metrike mogu biti efikasnije u procjeni povezanosti dvije varijable i njihovih nelinearnih odnosa.

U literaturi su istraživane i druge metrike komplementarnosti koji nisu direktno zasnovane na koeficijentima korelacije. Beluco i dr. [94] predložili su indeks komplementarnosti kao metriku za analizu energetske komplementarnosti sunčevog zračenja i hidropotencijala u Brazilu. Indeks komplementarnosti je bezdimenzionalna veličina koja se dobiva kao umnožak triju parcijalnih indeksa:

- parcijalnog indeksa vremenske komplementarnosti k_t ,
- parcijalnog indeksa energetske komplementarnosti k_e i
- parcijalnog indeksa amplitude komplementarnosti k_a .

Pojedini parcijalni indeksi se računaju pomoću sljedećih jednadžbi:

$$k_t = \frac{|d_x - d_y|}{\sqrt{|D_x - d_x||D_y - d_y|}} \quad (3.3)$$

gdje su:

D_x i D_y broj dana u kojima je uočena maksimalna proizvodnja iz izvora x i y

d_x i d_y broj dana u kojima je uočena minimalna proizvodnja iz izvora x i y

$$k_e = 1 - \sqrt{\frac{(\sum_t x_i - \sum_t y_i)^2}{(\sum_t x_i + \sum_t y_i)^2}} \quad (3.4)$$

$$k_a = \begin{cases} 1 - \frac{(\Delta_x - \Delta_y)^2}{(1 - \Delta_y)^2} & \text{za } \Delta_x > \Delta_y \\ \frac{(1 - \Delta_y)^2}{(1 - \Delta_y)^2 + (\Delta_x - \Delta_y)^2} & \text{za } \Delta_x < \Delta_y \end{cases} \quad (3.5)$$

U gornjoj jednadžbi, Δ_x i Δ_y označavaju razliku između maksimalne i minimalne dostupnosti izvora x i y te se računaju prema sljedećoj jednadžbi (primjer za izvor x , ekvivalentno za y):

$$\Delta_x = 1 + \frac{\max^d(x_i) - \min^d(x_i)}{\bar{d}_x} \quad (3.6)$$

gdje \max^d i \min^d označavaju maksimalnu i minimalnu dnevnu vrijednost proizvodnje izvora, respektivno, a \bar{d}_x označava prosječnu dnevnu potrošnju.

Metrika za komplementarnost dobivene su i korištenjem izraza izvedenih iz fluktuacija proizvodnje. Murata i dr. [95] predložili su sljedeću metriku za komplementarnost:

$$k_M = \frac{\max^T(\delta_t)}{\sigma_x} \quad (3.7)$$

gdje je:

$\delta_t = x_t - x_{t-1}$	fluktucija snage odnosno razlika između proizvodnje u sadašnjem i prethodnom diskretnom vremenskom koraku
\max^T	maksimalna vrijednost unutar vremenskog prozora širine T ,
σ_x	standardna devijacija varijable x .

Upravo se zbog česte upotrebe koeficijenta korelacije, u literaturi umjesto pojma komplementarnosti upotrebljava i izraz anti-korelacija [3]. Međutim, komplementarnost označava međusobno nadopunjavanje proizvodnih profila dvaju izvora, a anti-korelacija označava da je porast proizvodnje jednog izvora praćen padom proizvodnje drugog izvora. Dakle, anti-korelacija ne mora nužno biti prava mjera komplementarnosti.

Komplementarnost uvijek podrazumijeva anti-korelaciju, dok anti-korelacija ne podrazumijeva komplementarnost [96]. Iz istog razloga, koeficijenti korelacije općenito imaju ograničenu mogućnost pružanja točnije informaciju o interakcijama između varijabli, a posebice kada između dviju varijabli postoji značajna razlika u iznosu [97].

U nedavnom radu [97] predložene su nove metrike za komplementarnost zasnovane na konceptu ukupne varijacije (engl. *total variation*), koja se za funkciju f na intervalu $[a, b]$ može definirati kao:

$$\bigvee_a^b f = \sup \sum_{i=1}^n |f(t_i) - f(t_{i-1})| \quad (3.8)$$

Korištenjem ukupne varijacije, definirani su indeks komplementarnosti ukupne varijacije (engl. *total variation complementarity index*), indeks komplementarnosti varijance (engl. *variance complementarity index*) i indeks komplementarnosti standardne devijacije (engl. *standard deviation complementarity index*). Indeksi su definirani redoslijedno u nastavku.

Indeks komplementarnosti ukupne varijacije između funkcija $f_1(t)$ i $f_2(t)$ definira se kao:

$$\phi(f_1, f_2) = 1 - \frac{V_a^b(f_1 + f_2)}{V_a^b f_1 + V_a^b f_2} \quad (3.9)$$

Indeks komplementarnosti varijance definira se kao:

$$\phi_v(f_1, f_2) = 1 - \frac{\text{Var}[f_1 + f_2]}{\text{Var}[f_1] + \text{Var}[f_2]} \quad (3.10)$$

Indeks komplementarnosti standardne devijacije definira se kao:

$$\phi_s(f_1, f_2) = 1 - \frac{\sigma[f_1 + f_2]}{\sigma[f_1] + \sigma[f_2]} \quad (3.11)$$

Indeks komplementarnosti ukupne varijance jednak je 1 ako između funkcija f_1 i f_2 postoji savršena komplementarnost, tj. ako su f_1 i f_2 konstantne funkcije. Ako se želi vratiti na koncept korelacije, autori su predložili zamjenu ukupne varijacije s varijancom, čime se dobiva indeks komplementarnosti varijance definiran jednadžbom (3.10). Ista jednadžba može se napisati kao [97]:

$$\phi_v(f_1, f_2) = -\rho_P \frac{2\sqrt{\text{Var}[f_1]\text{Var}[f_2]}}{\text{Var}[f_1] + \text{Var}[f_2]} \quad (3.12)$$

Dakle, funkcija ϕ_v je definirana kao negativni Pearsonov koeficijent korelacije pomnožen s omjerom geometrijske i aritmetičke sredine varijanci. Navedena korekcija pomaže kada postoje značajne razlike u iznosu vremenskih serija. Slična korekcija se primjenjuje na indeks komplementarnosti standardne devijacije definiran jednačbom (3.11).

Detaljniji pregled metrika korištenih za kvantifikaciju komplementarnosti dostupan je u [4].

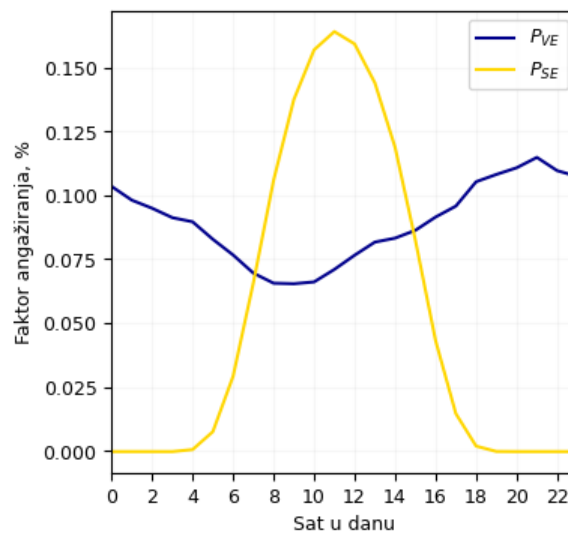
Efikasnost korištenja pojedinih metrika potrebno je sagledati iz praktičnog aspekta, tj. kako je predmetna metrika povezana s odbačenom proizvodnjom koja se javlja prilikom hibridizacije VE sa SE. Lindberg i Lingfors [39] su korištenjem podataka proizvodnje 264 vjetroelektrana u Švedskoj u satnoj rezoluciji tijekom perioda od dvije godine ispitali povezanost Pearsonovog koeficijenta korelacije i odbačene proizvodnje. Na svakoj od lokacija preuzeti su podaci sunčevog zračenja i modelirana je proizvodnja SE. Cilj je provedenog istraživanja pokazati može li se koeficijent korelacije efikasno primijeniti za odabir povoljnih lokacija za hibridizaciju. Autori su pokazali da postoji pozitivna korelacija ($\rho=0,59$) između odbačene proizvodnje u hibridnim elektranama i Pearsonovog koeficijenta korelacije. Drugim riječima, veći Pearsonov koeficijent korelacije će u prosjeku rezultirati nešto većom odbačenom proizvodnjom u hibridnoj elektrani pri proširenju VE s istim kapacitetom SE.

Prethodni rad otvara mogućnost daljnjeg istraživanja u području komplementarnosti proizvodnje VE i SE, koje je potrebno tražiti upravo u povezanosti pojedinih metrika s komplementarnosti i odbačenom proizvodnjom.

3.2.3 Proizvodni profili vjetroelektrana

Umjesto direktne primjene metrika za kvantifikaciju, komplementarnost između proizvodnje VE i SE u literaturi je sagledana i usporedbom proizvodnih profila VE i SE na određenom području. Ključno je ispitati učestalost proizvodnje VE tijekom dnevnih sati.

Slika 3-4 prikazuje faktor angažiranja VE i SE po satima tijekom razmatranog perioda proizvodnje. Proizvodni profil kod SE općenito ne pokazuje značajne razlike s obzirom na lokaciju, već primarno ovisi o tipu montažne konstrukcije (fiksna ili s praćenjem u jednoj osi) te o orijentaciji FN modula kod fiksne konstrukcije. Kod VE razlike u proizvodnim profilima mogu biti značajne, ali su općenito karakterizirane manjom dnevnom proizvodnjom u odnosu na noćni period.

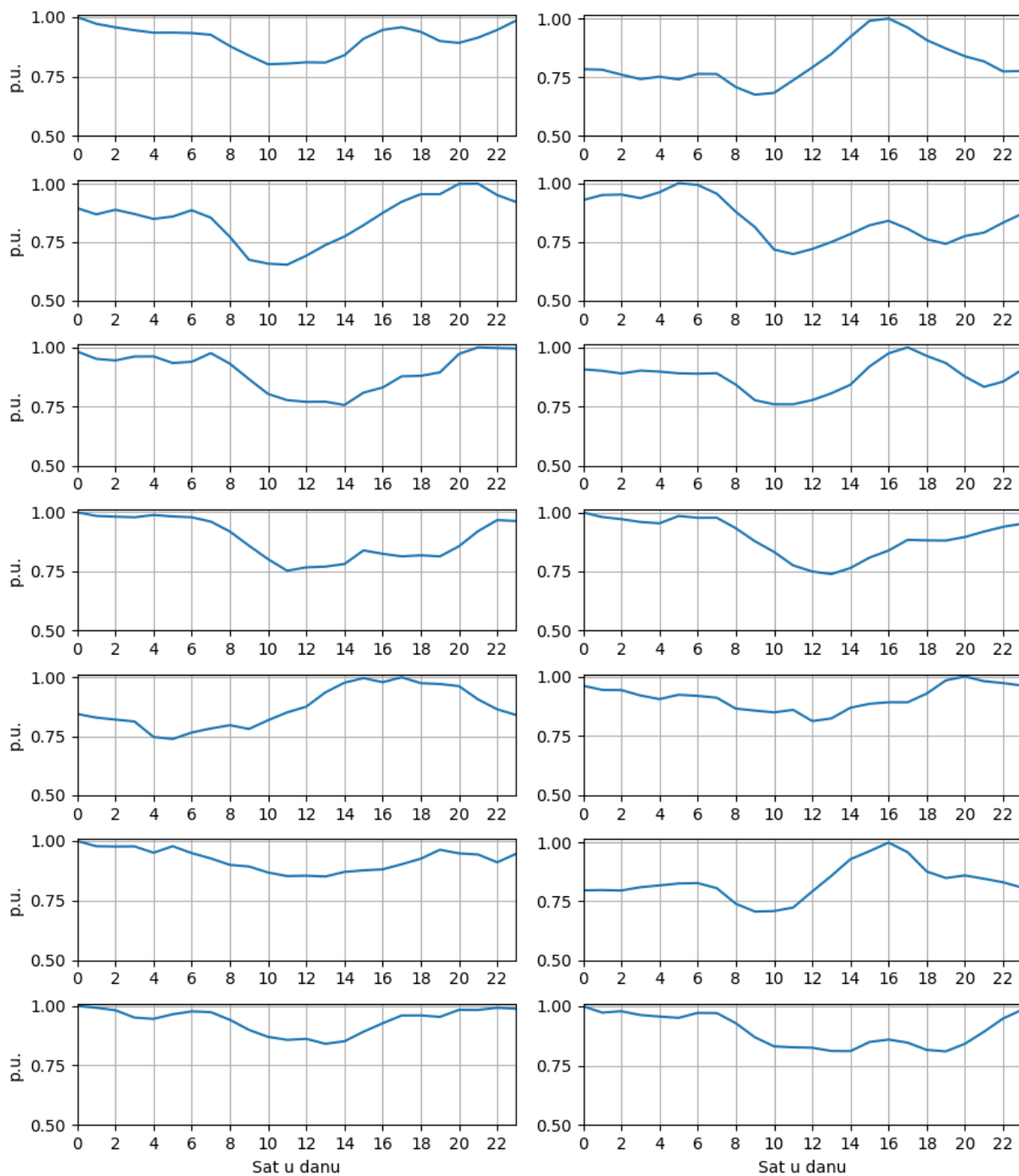


Slika 3-4 Primjer prosječnog dnevnog proizvodnog profila VE i SE

Prvo istraživanje provedeno je u Australiji na postojećim lokacijama VE u [37]. Proizvodnja VE prikazana je korištenjem prosječnih dnevnih prilika po različitim regijama. U većini regija uočen je karakteristični pad prosječne proizvodnje VE tijekom dana, a koji otvara mogućnost za popunjavanje s proizvodnjom iz SE. Autori su pokazali da je na svih deset lokacija postojećih VE moguće provesti hibridizaciju sa SE instalirane snage 25% do 50% postojeće snage VE uz ograničenje odbačene proizvodnje SE do maksimalno 5%.

Couto i Estanquero [38] su na sličan način razmatrali mogućnost hibridizacije postojećih VE u Portugalu. Proizvodni profili VE su klasificirani u osam grupa sa sličnim karakteristikama vjetra. Pokazano je da će uz proširenje VE sa SE instalirane snage 50% postojeće snage VE gubici iznositi najviše 4,5% ukupne proizvodnje, dok će uz isto proširenje sa VE gubici iznositi 5%-30%. Dakle, upravo zbog komplementarnosti omogućava se povoljnije proširenje VE sa SE u odnosu na klasično proširenje s novim vjetroturbinama koje nisu komplementarne s postojećim.

Razlike između proizvodnih profila VE u Hrvatskoj ispitane su na 14 većih VE za koje su dostupni 15 min podaci izlazne radne snage tijekom 2020. godine. Za svaku vjetroelektranu, izračunat je prosječni dnevni profil proizvodnje, te je isti normaliziran s maksimalnom prosječnom proizvodnjom. Tako dobivene vrijednosti prikazane su na slici 3-5. Vidljivo je da svaka elektrana ima nešto manju prosječnu proizvodnju u periodu 8 h – 14 h, dok se najčešće maksimalna proizvodnja javlja iza 16 h ili prije 6 h. Daljnje istraživanje je potrebno kako bi se utvrdila efikasnost primijene prosječnog proizvodnog profila s obzirom na odabir povoljnih lokacija za hibridizaciju.



Slika 3-5 Normalizirani prosječni dnevni proizvodni profili 14 VE u Hrvatskoj u 2020. godini

3.3 Odbačena proizvodnja zbog ograničene priključne snage

3.3.1 Definicija odbačene proizvodnje

Kada je ukupna instalirana/vršna snaga hibridne elektrane veća od ugovorene priključne snage, javljaju se gubici koje nazivamo odbačenom proizvodnjom (engl. *curtailment losses*). Gubici se javljaju u vremenskim periodima kada je moguća proizvodnja VE + SE na pragu mreže veća od priključne snage, pri čemu se sav višak energije koji premašuje priključnu snagu odbacuje.

U literaturi ne postoji jedinstvena matematička definicija odbačene proizvodnje, a sam pojam se uzima kao apriori definiran. Međutim, primjetno je da autori odbačenu proizvodnju najčešće računaju na dva načina, tj. kao:

- a) omjer odbačene proizvodnje i ukupne proizvodnje hibridne elektrane na pragu mreže i
- b) omjer odbačene proizvodnje i proizvodnje SE.

U oba slučaja, odbačena proizvodnja se izražava u postotnim iznosima. Pristup a) se koristi češće, dok se pristup b) koristi isključivo kada je riječ o hibridizaciji, tj. proširenju postojeće VE s novom SE uz jedinstveno mjesto priključka na elektroenergetsku mrežu. S obzirom da se u literaturi redovito razmatra slučaj kada je priključna snaga jednaka vršnoj snazi VE, potonji slučaj sa stanovišta tehno-ekonomske evaluacije projekta SE ima smisla budući da je odbačena proizvodnja posljedica isključivo rada SE (prije nije postojala). SE se tada može gledati kao zasebna cjelina, a isplativost projekta usporediti npr. s alternativnim pristupom izgradnje SE na zasebnoj lokaciji. Potrebno je napomenuti da je pridjeljivanje odbačene proizvodnje SE opravdano samo ako je vršna snaga VE manja ili jednaka od priključne snage postojeće VE, odnosno kada prije hibridizacije odbačena proizvodnja nije postojala. Ako nije, pri evaluaciji doprinosa SE povećanju odbačene proizvodnje potrebno je odbiti odbačenu proizvodnju kao posljedicu rada VE prije hibridizacije.

Iz prethodno navedenih razloga, a radi mjerodavnosti i usporedbe primijenjenog pristupa, iznosi se definicija odbačene proizvodnje. Odbačena proizvodnja se definira kao ukupni iznos gubitaka energije i izražava kao suma svih gubitaka snage koji se javljaju tijekom perioda kada je moguća proizvodnja hibridne elektrane na mjestu priključka veća od priključne snage (P^{max}), izraženo u apsolutnom (npr. MWh) ili postotnom iznosu. Formulirano preko matematičkog izraza, odbačena snaga može se raspisati kao:

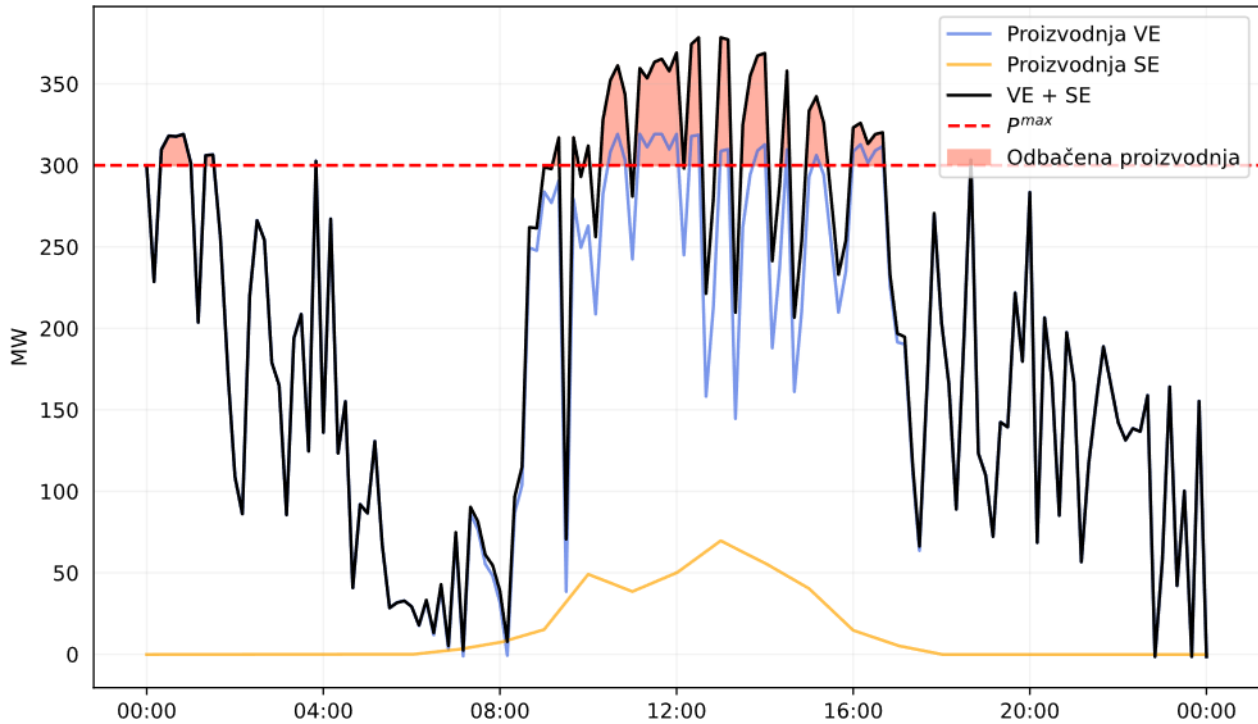
$$\Delta P_t^{op} = \begin{cases} P_t^{VE} + P_t^{SE} - \Delta P_t^{TR} - P^{max}, & \text{ako je } P_t^{VE} + P_t^{SE} - \Delta P_t^{TR} \geq P^{max} \\ 0, & \text{inače} \end{cases} \quad (3.13)$$

gdje je P_t^{VE} i P_t^{SE} izlazna snaga VE i SE, respektivno, u diskretnom intervalu t prije gubitaka u energetskom transformatoru, a ΔP_t^{TR} gubici radne snage u transformatoru. U općenito slučaju kada nema SN/VN transformatora, ili kada je mjesto priključka na SN strani transformatora, parametar ΔP_t^{TR} se može izostaviti iz jednadžbe (3.13).

S tako definiranim gubicima snage, odbačena proizvodnja uslijed ograničenja priključne snage se računa kao suma odbačene snage:

$$\Delta E^{op} = \Delta t \cdot \sum_{t \in T} \Delta P_t^{op} \quad (3.14)$$

gdje je Δt vremenski interval u satima koji ovisi o korištenoj vremenskoj rezoluciji podataka. Na primjer, $\Delta t=1$ h za 1 h rezoluciju, $\Delta t=0,25$ h za 15 min, a za 1 s iznosi $\Delta t=0,000278$ h odnosno $\Delta t=1/3600$ h. Ilustracija odbačene proizvodnje prikazana je na slici 3-6, gdje ukupna odbačena proizvodnja odgovara površini koju prekriva crvena površina.



Slika 3-6 Ilustracija odbačene proizvodnje

U postotnom iznosu s obzirom na ukupnu snagu hibridne elektrane, odbačena proizvodnja se izražava preko sljedećeg izraza:

$$\Delta E_{\%}^{op} = \frac{\Delta E^{op}}{\sum_{t \in T} (P_t^{VE} + P_t^{SE} - \Delta P_t^{TR}) \cdot \Delta t} \quad (3.15)$$

Kada je mjesto priključka na SN strani energetskog transformatora ili kada se priključak izvodi direktno na SN mrežu bez transformatora, odbačena proizvodnja u postotnom iznosu računa se preko pojednostavljenog izraza:

$$\Delta E_{\%}^{op} = \frac{\Delta E^{op}}{\sum_{t \in T} (P_t^{VE} + P_t^{SE}) \cdot \Delta t} \quad (3.16)$$

Ako se odbačena proizvodnja želi izraziti u postotnom iznosu proizvodnje SE kao što je prethodno navedeno, prethodni izraz se može raspisati kao:

$$\Delta E_{\%}^{op} = \frac{\Delta E^{op}}{\sum_{t \in T} P_t^{SE} \cdot \Delta t} \quad (3.17)$$

Gubici radne snage u energetskom transformatoru općenito se mogu podijeliti na varijabilne i fiksne gubitke, a računaju se preko sljedeće jednadžbe:

$$\Delta P_t^{TR} = P^{TR,Cu} \cdot \left(\frac{S_t^{HE}}{S^{TR,n}} \right)^2 + P^{TR,ph} \quad (3.18)$$

gdje su:

- $P^{TR,Cu}$ nazivni gubici u bakru,
- S_t^{HE} prividna snaga hibridne elektrane,
- $S^{TR,n}$ nazivna snaga transformatora,

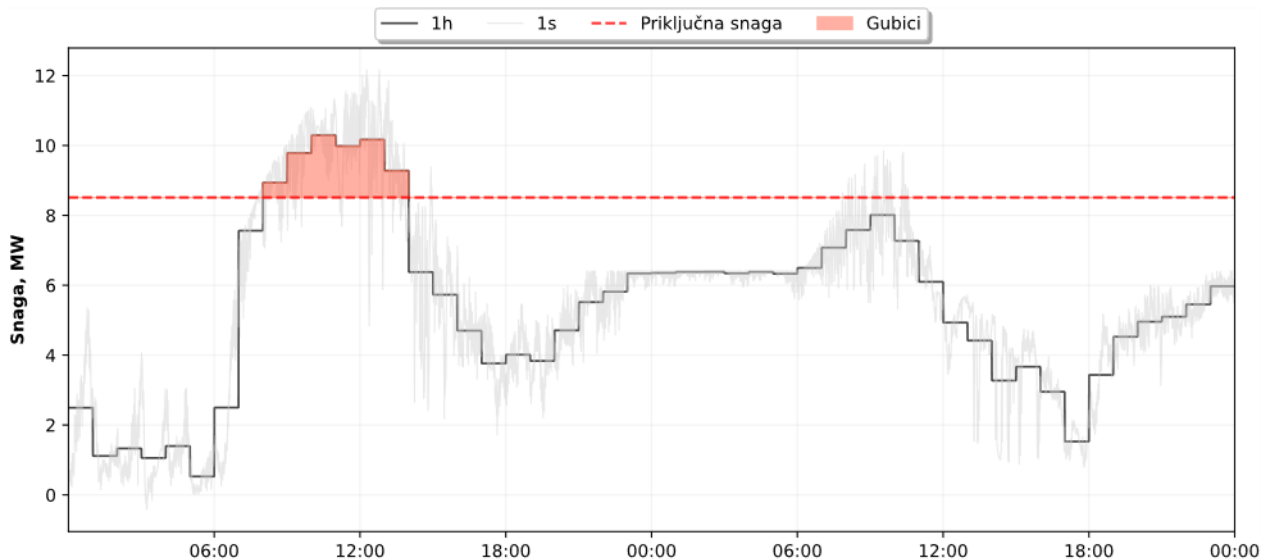
$P^{TR,ph}$ gubici praznog hoda u transformatoru (fiksni dio gubitaka).

S obzirom da se za potrebe izračuna odbačene proizvodnje ne razmatraju tokovi jalove snage, prividna snaga S_t^{HE} u jednadžbi (3.18) može se izraziti kao suma izlazne radne snage VE i SE prije gubitaka u energetskom transformatoru.

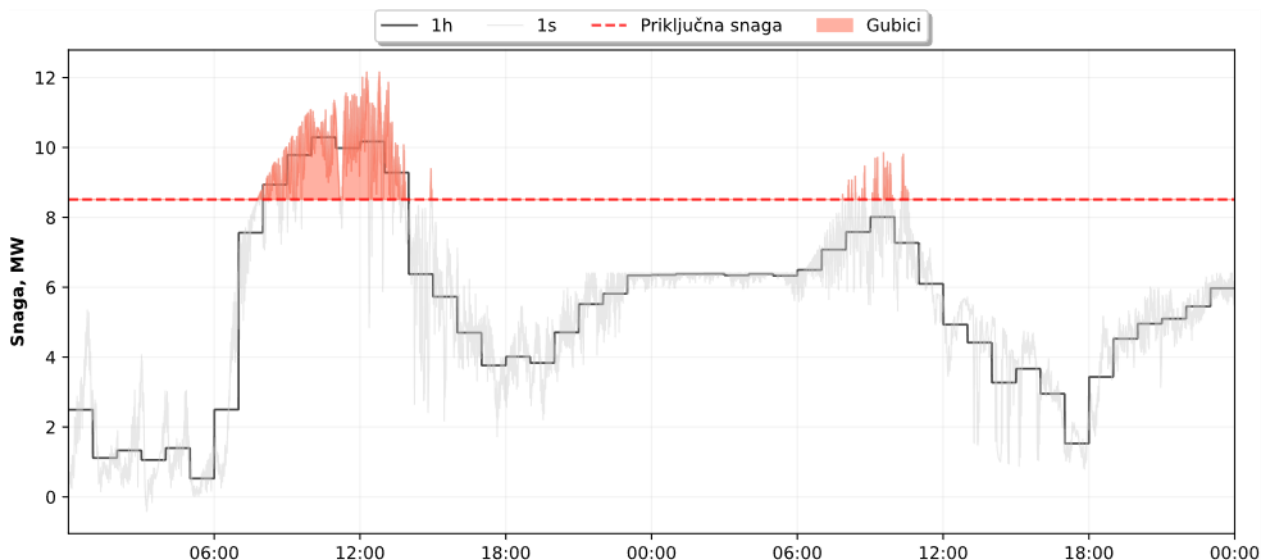
3.3.2 Problematika procjene odbačene proizvodnje

Iako je odbačena proizvodnja jednostavno definirana i podložna je strogoj matematičkoj definiciji, kod izračuna odbačene proizvodnje potrebno je uvažiti i vremensku rezoluciju podataka jer se proizvodnja VE i SE razmatra diskretizirano, tj. kao srednja vrijednost zabilježenih mjerenja tijekom perioda primijenjene rezolucije (npr. 1 h, 15 min, 10 min i sl.). Korištenjem niže vremenske rezolucije (npr. 1 h podataka) ne mogu se uočiti fluktuacije čiji je period kraći od predmetne rezolucije. Kažemo da se procesom usrednjenja gubi informacija o stvarnim fluktuacijama snage unutar intervala vremenske rezolucije na koju se vremenska serija usrednjuje. Jasno je da će „gubitak“ informacije o fluktuacijama ovisiti o širini intervala usrednjenja (npr. biti će veći kod 1 h u odnosu na 10 min rezoluciju). Međutim, gubitak informacije će zavisiti i o tipu korištene tehnologije odnosno količini fluktuacija koje inače dolaze do izražaja. Na primjer, fluktuacije proizvodnje SE su izraženije u odnosu na VE, a samim time će procesom usrednjavanja na istu rezoluciji doći do većeg gubitka fluktuacija kod SE u odnosu na VE. Nadalje, gubitak informacije o fluktuacijama će zavisiti i o veličini VE i SE jer su fluktuacije u proizvodnji manje izražene kod većih elektrana kao posljedica efekta poravnjanja.

Budući da su fluktuacije snage direktno povezano s odbačenom proizvodnjom, korištenjem niže vremenske rezolucije u stvarnosti se podcjenjuju stvarni gubici, odnosno unosi se pogreška u proračun odbačene proizvodnje. Primjer pogreške u procjeni odbačene proizvodnje prikazan je na slikama 3-7 i 3-8. Na slikama je prikazana proizvodnja hibridne elektrane (VE + SE) u 1 s i 1 h rezoluciji na pragu mreže, te priključna snaga (označena crvenom iscrtanom linijom). Proizvodnja u 1 h rezoluciji dobivena je usrednjenjem 1 s rezolucije (srednja vrijednost 60 jednosekundnih podataka). Na slici 3-7, procijenjeni gubici proizvodnje u 1 h rezoluciji prikazani su u crvenoj boji te predstavljaju razliku površine obuhvaćene krivuljom 1 h proizvodnje i priključne snage tijekom perioda kada je moguća proizvodnja veća od priključne snage. Uočava se da je korištenjem 1 h rezolucije uočen samo dio odbačene proizvodnje, dok se preciznija procjena može postići direktnim korištenjem 1 s rezolucije (Slika 3-8). Također, površina određena razlikom krivuljom proizvodnje hibridne elektrane u 1 s rezoluciji i priključne snage je veća u odnosu na istu površinu dobivenu 1 h rezolucijom. Razlog zbog koje postoje nejednakosti proizlazi direktno iz fluktuacija snage. U pojedinom vremenskom intervalu moguća proizvodnja hibridne elektrane može premašiti priključnu snagu, dok istovremeno prosjek proizvodnje u odgovarajućoj rezoluciji ne mora. Razlika navedenih površina predstavlja pogrešku u procjeni odbačene proizvodnje.



Slika 3-7 Procjena odbačene proizvodnje u 1 h vremenskoj rezoluciji



Slika 3-8 Procjena odbačene proizvodnje u 1 s vremenskoj rezoluciji

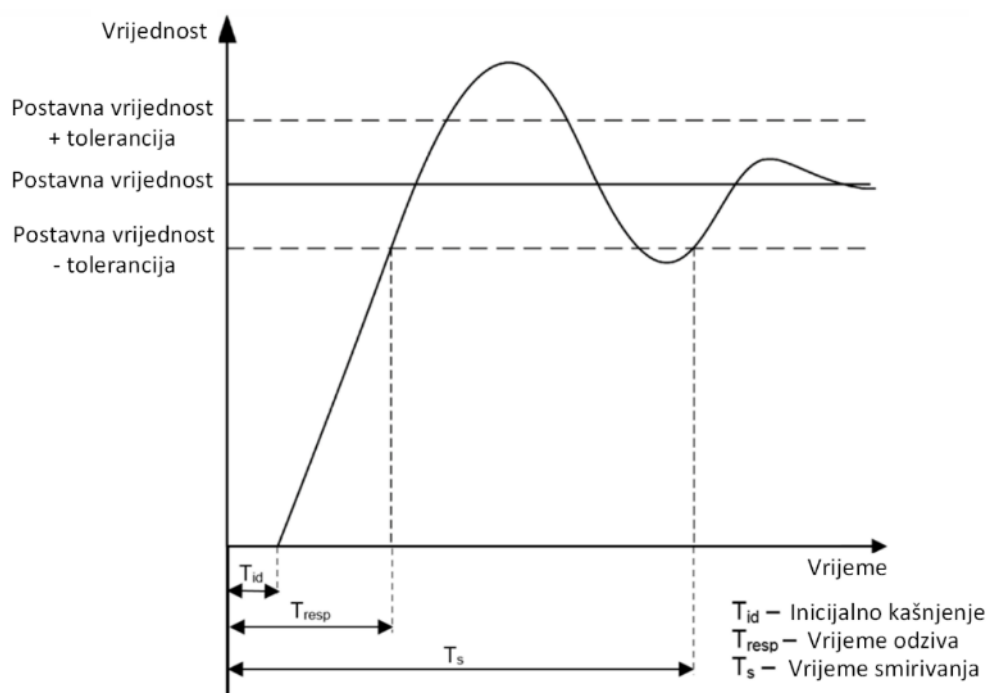
3.3.3 Ograničenje priključne snage

Ograničenje snage elektrane vrši se na mjestu priključka preko upravljačkog sustava elektrane (engl. *power plant controller*) ili kontrolera koji prima mjerenja s mjesta priključka (radna i jalova snaga, napon, frekvencija) i signale od nadležnog operatora prijenosnog/distribucijskog sustava te šalje upravljačke signale na podređene upravljačke sustave (druge upravljačke sustave ili izmjenjivače). U nekim radovima, npr. [25], [31], ograničenje je promatrano uslijed nazivne snage energetskog transformatora (topologija mreže s SN/VN transformatorom) [31] i prijenosne moći podmorskog kablenskog voda [25]. Međutim, u takvim razmatranjima nije dovoljno promatrati samo radnu snagu, već je potrebno uvažiti i tokove jalove snage i naponske prilike na mjestu priključka koji imaju značajan utjecaj na opterećenje pojedinih elemenata interne mreže elektrane (osobito kada elektrana radi s faktorom snage $\cos\varphi < 1$). Iz istoga razloga, takva varijanta ograničenja se u sklopu ove disertacije neće promatrati.

Upravljački sustav se ponaša kao regulator, najčešće tipični PI regulator, koji ograničava snagu na P^{\max} na mjestu priključka. Odziv elektrane (npr. radne snage) na promjenu upravljačke veličine (npr. promjena priključne snage) prikazan je na slici 3-9.

Parametri prema slici 3-9 definirani su normom HRN EN 50549-2 [98]:

- Inicijalno kašnjenje T_{id} (engl. *initial delay* ili *dead time*): proteklo vrijeme između trenutka promjene upravljačke veličine do trenutka promjene izlazne veličine.
- Vrijeme odziva T_{resp} (engl. *step response time*): proteklo vrijeme između trenutka promjene upravljačke veličine i trenutka kada je izlazna veličina prvi puta dosegla raspon tolerancije.
- Vrijeme smirivanja T_s (engl. *settling time*): proteklo vrijeme između trenutka promjene upravljačke veličine i trenutka kada izlazna veličina ostaje unutar granica tolerancije oko postavne vrijednosti.

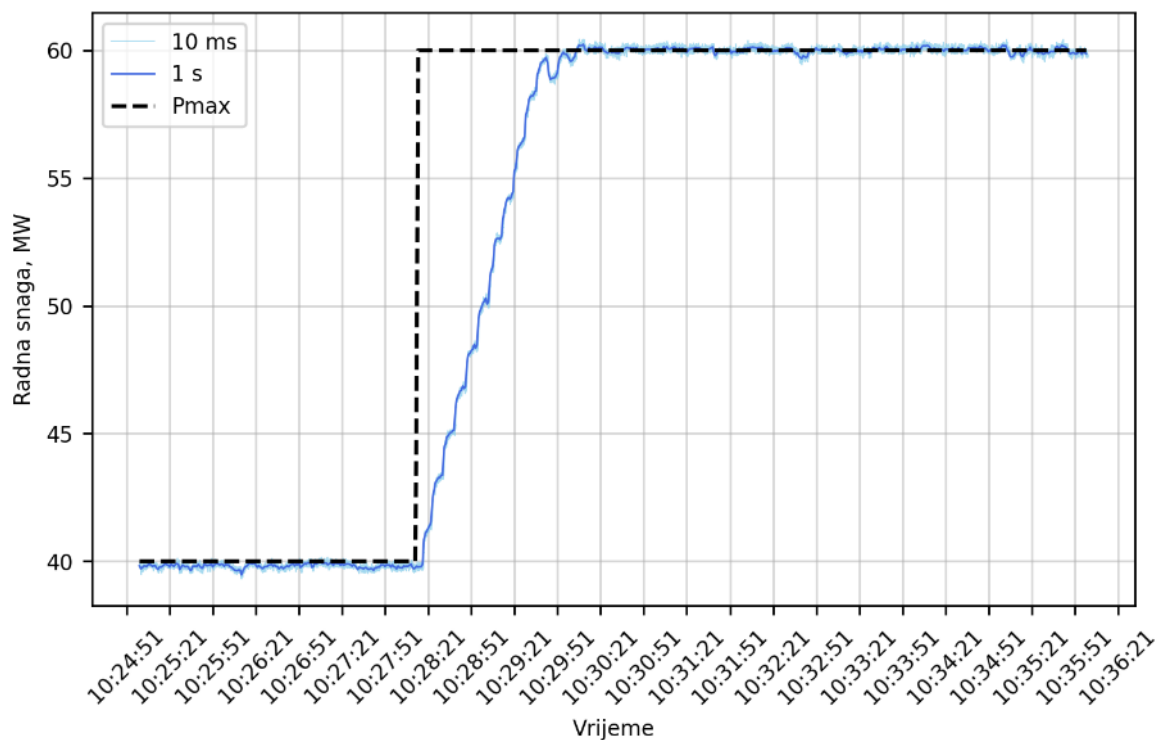


Slika 3-9 Odziv elektrane na skokovitu promjenu postavne vrijednosti regulatora prema HRN EN 50549-2

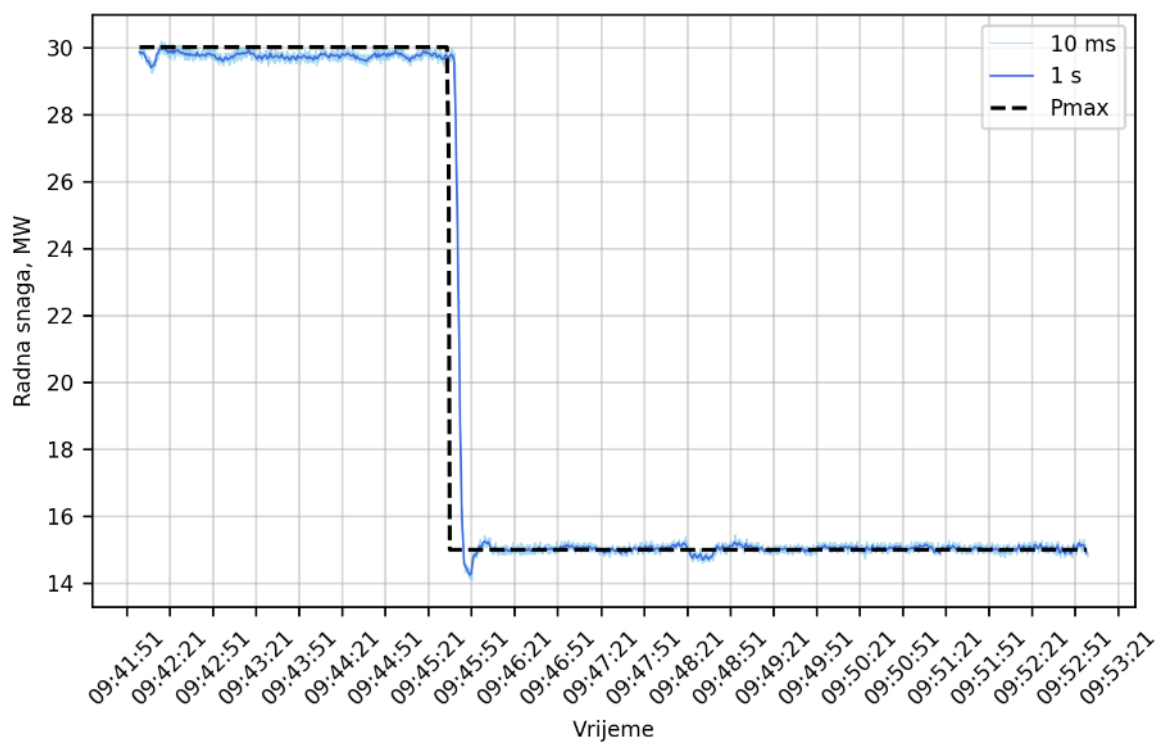
Prema prethodnoj slici vidljivo je da elektrana ne može trenutno reagirati na promjenu upravljačke veličine, tj. ima odgovarajuće kašnjenje. Sa slike je također vidljiv i prebačaj u odzivu, koji se definira kao razlika između maksimalne vrijednosti odziva i postavne vrijednosti.

Stvarni odziv vjetroelektrane na promjenu priključne snage tijekom ispitivanja prikazan je na slici 3-10. Mjerenja radne snage na mjestu priključka dostupna su u 10 ms rezoluciji, a odziv vjetroelektrane snimljen je pri povećanju priključne snage s manje na veću (a), te pri smanjenju priključne snage s veće na manju (b). Sa slike je moguće primijetiti da regulator uspješno uspijeva održavati proizvodnju VE na zadani iznos priključne snage. Pritom, pri povećanju priključne snage nema prebačaja, dok je isti zabilježen pri smanjenju priključne snage.

Potrebno je napomenuti da je oblik odziva moguće regulirati promjenom parametara PI regulatora, čime je moguće dobiti željeni odziv elektrane pri promjeni priključne snage te po potrebi eliminirati prebačaj.



(a)



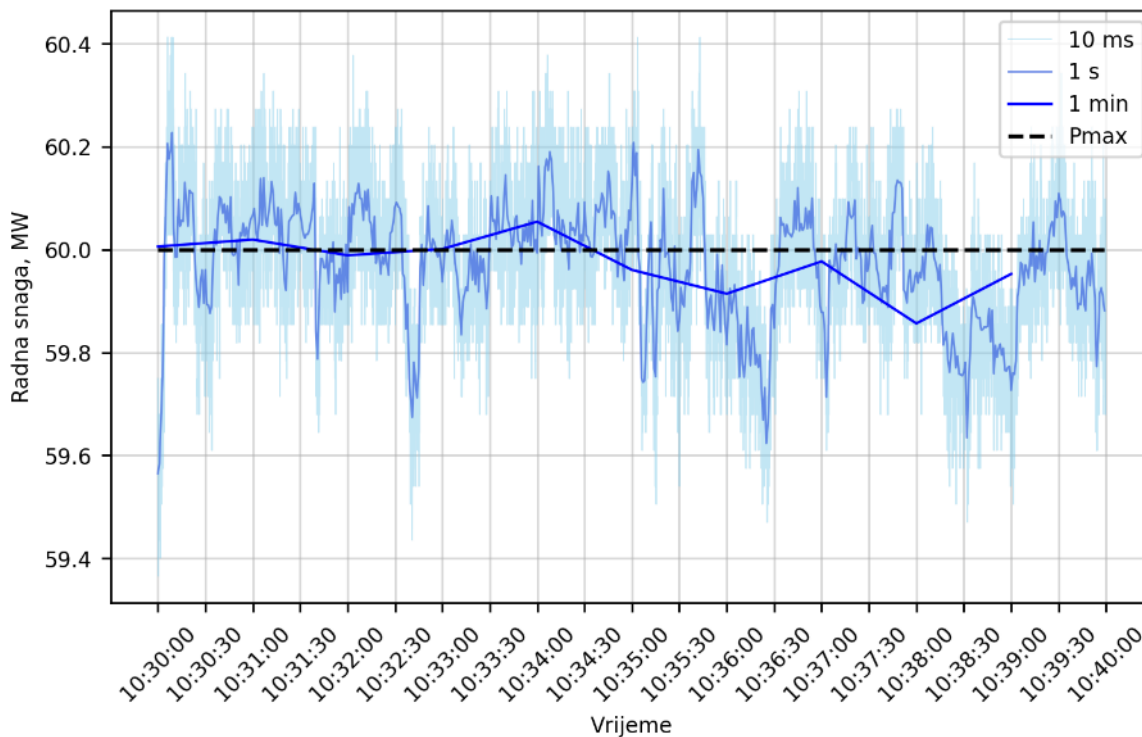
(b)

Slika 3-10 Stvarni odziv vjetroelektrane na skokovitu promjenu postavne priključne snage na regulatoru (P_{max}), mjereno u 10 ms rezoluciji, pri (a) povećanju P_{max} i (b) smanjenju P_{max}

Vremena kašnjenja, odziva i smirivanja kao i prebačaja nisu propisana u HRN EN 50549-2, već ih definira nadležni operator prijenosnog sustava ili distribucijskog sustava. U Hrvatskoj, operatori prijenosnog i distribucijskog sustava (HOPS i HEP-ODS) nemaju propisane iznose navedenih veličina. Priključna snaga definirana u ugovoru o priključenju elektrana predstavlja srednju vrijednost snage obračunate u 15 min

intervalu (obračunski mjerni interval). Dakle, operator sustava u Hrvatskoj ne ograničava mogućnost elektrane da kratkotrajno premaši priključnu snagu u periodima kraćim od 15 min.

Zabilježene fluktuacije snage oko postavne vrijednosti priključne snage prikazane su na slici 3-11. Primjetno je da 10 ms fluktuacije su unutar granica $\pm 1\%$ priključne snage, te se smanjuju pri nižim rezolucijama (npr. kod 1 min rezolucije su značajno manje).



Slika 3-11 Fluktuacije proizvodnje VE oko priključne snage

Pri proračunu odbačene proizvodnje, pretpostavljena je trenutna redukcija izlazne radne snage na priključnu snagu, odnosno da niti jedna kratkotrajna vrijednost snage neće premašiti priključnu snagu. S obzirom na nesavršenost regulatora, u stvarnosti je moguće očekivati da proizvodnja kratkotrajno premaši iznos priključne snage. Trajanje i iznos prekoračenja ovisi o postavkama i izvedbi regulatora.

4. ANALIZA ODBAČENE PROIZVODNJE PRI NIŽIM VREMENSKIM REZOLUCIJAMA

U ovom poglavlju provedena je analiza odbačene proizvodnje pri nižim vremenskim rezolucijama. Na ovakvim vremenskim rezolucijama nije izraženo prigušenje fluktuacija i efekt poravnanja u VE i SE, zbog čega je modeliranje VE i SE provedeno primjenom klasičnih modela prema poglavlju 2. Dakle, doprinos fluktuacija s kraćim periodima koji se ne mogu obuhvatiti nižim rezolucijama se zanemaruje, a samim time se stvarni gubici djelomično podcjenjuju.

Tema odbačene proizvodnje u hibridnim elektranama sastavljenim od VE i SE nije dovoljno istražena, što je prethodno zaključeno u preglednim radovima [3], [4]. Pregled radova koji obrađuju tematiku odbačene proizvodnje u hibridnim elektranama s obzirom na korištene ulazne podatke VE i SE te način modeliranja prikazan je u tablici 4-1.

Table 4-1 Pregled radova koji obrađuju odbačenu proizvodnju u hibridnim elektranama s obzirom na korištene ulazne podatke za modeliranje VE i SE

Rad	Podaci za VE	Podaci za SE	Modeliranje
Lindberg i Lingfors (2022) [39]	1 h mjerenja izlazne snage iz VE	SMHI 1 h podaci	VE: Ne koristi se model SE: analitička metoda
Couto i Estanqueiro (2021) [38]	ECMWF ERA5 1 h brzina vjetra	PVGIS 1 h ozračenost	VE: P-v karakteristika SE: PVSyst
Ludwig i dr. (2021) [17]	Anemos Wind Atlas 15 min brzina vjetra	NASA/DLR 1 h ozračenost	VE: nije navedeno SE: PVSyst
Golroodbari i dr. (2021) [25]	KNMI2 Wind Atlas 1 h brzina vjetra	CAMS3 1 h ozračenost	VE: P-v karakteristika SE: analitička metoda
Lange i dr. (2021) [36]	1 min mjerenja izlazne snage (VE 2 MW)	1 min mjerenja izlazne snage (SE 1 MWp)	Ne koristi se model
Grab i dr. (2020) [31]	1 min mjerenja izlazne snage (VE 24 MW)	1 min mjerenja izlazne snage (SE 10,3 MWp)	Ne koristi se model
AECOM – studija (2016) [37]	Operativni podaci VE 10 min	BOM4 1 h ozračenost, 1 h temperatura zraka	VE: Ne koristi se model SE: PVSyst

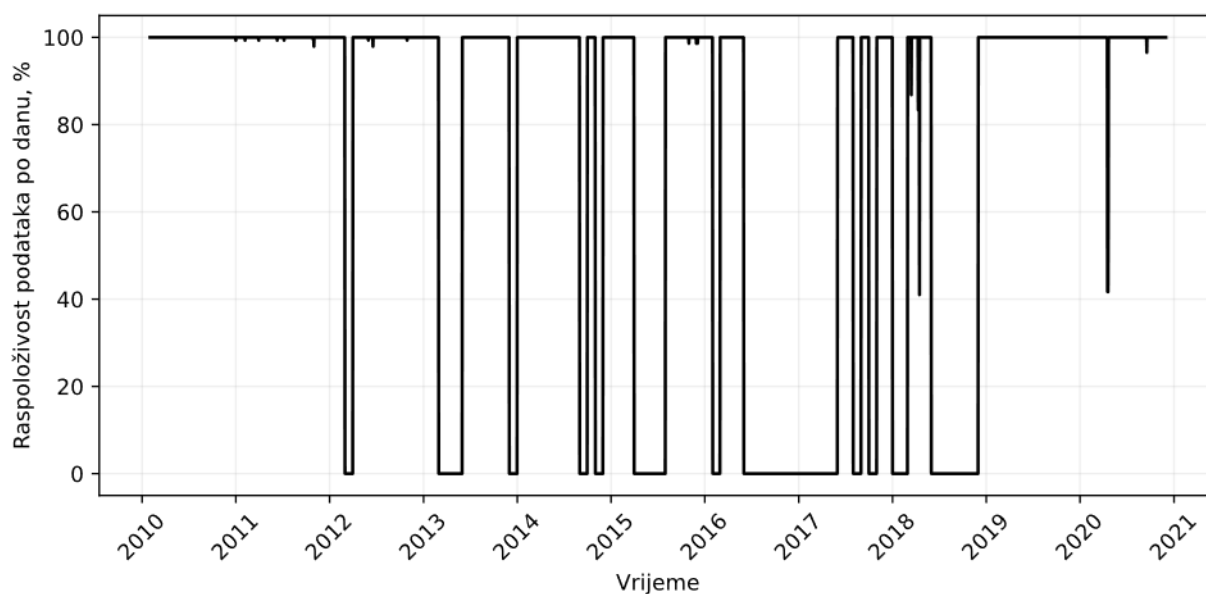
U prethodnim radovima, vidljivo je da su primarno korišteni podaci s kojima je proračun proizvodnje VE i SE napravljen u 1 h rezoluciji. Ukoliko je za podatke VE dostupna viša vremenska rezolucija u odnosu na SE, autori su proizvodnju VE usrednjili na 1 h rezoluciju prije proračuna odbačene proizvodnje. U dva rada [31], [36] autori su koristili operativne podatke izlazne radne snage VE i SE, što zasigurno daje preciznije rezultate u odnosu na druge radove s obzirom na korištene modele VE i SE. Naime, primijenjeni modeli VE u prethodnim radovima su ograničeni na primjenu P-v karakteristike VA i skaliranja na proizvodnju VE. Couto i Estanqueiro [38] su za modele VE koristili brzinu vjetra na visini 80 m dobivenu numeričkim prognostičkim modelima atmosfere (NWP, engl. *Numerical Weather Prediction*), dok je proizvodnja VE generirana primjenom P-v karakteristike najučestalijeg vjetroagregata u Portugalu – Enercon E82 nazivne snage 2 MW, čija je proizvodnja skalirana na 20 MW. Ovakvim postupkom zanemaruju se zavjetrinski gubici. Ludwig i dr. [17] su hibridnu elektranu modelirali u programskom paketu INSEL (engl. *Integrated Simulation Environment Language*), ali autori nisu iznijeli tehničke detalje o osnovnim ulaznim

parametrima. U Goolrodbari i dr. [25], model priobalne VE je također zasnovan na modelu vjetroagregata čija je proizvodnja dobivena primjenom VA Siemens Gamesa 8 MW. Za modeliranje SE je korištena odgovarajuća analitička metoda (npr. proizvodnja SE u Lindberg i Lingfors [39] dobivena je množenjem zračenja pod kutem FN modula s površinom SE i ukupnom efikasnošću SE) ili programski paket PVSyst. Dakako, model u PVSyst je sofisticiraniji, ali je proračun ograničen na 1 h rezoluciju. Dakle, moguće je zaključiti da većina prethodnih radova primjenjuje pojednostavljene modele VE i SE (gdje se primjenjuje modeliranje) i to u 1 h rezoluciji, a u sklopu proračuna nije razmatrano koliko će iznositi međugodišnje fluktuacije odbačene proizvodnje (razmatranja su uglavnom ograničena na jednu godinu).

4.1 Ulazni podaci za VE

Mjerni podaci za VE su preuzeti s tri mjerna stupa na planiranoj lokaciji VE. Dostupni mjerni podaci su u 10 min rezoluciji tijekom perioda od dvije godine. Podaci su filtrirani i procesirani za događaje koje uključuju zaleđivanje, neraspoloživost mjerenja uslijed komunikacijskih poteškoća i utjecaj stupa na mjerni senzor (npr. vjetra dolazi na mjerni senzor iz smjera stupa koji degradira stvarnu sliku brzine vjetra).

Ekstenzija mjerenih podataka provedena je primjenom MCP procedure korištenjem dugoročnih mjerenja s mjernog stupa pozicioniranog cca 10 km od tri mjerna stupa na lokaciji planirane VE. Neobrađeni podaci na potonjem dostupni su u periodu 1.2.2010. – 3.11.2020., pri čemu je neto dostupnost podataka cca 9,9 godina nakon filtriranja. Dnevna raspoloživost 10 min podataka u % tijekom razmatranog perioda prikazana je na slici 4-1. Najveći udio nedostupnih podataka je u 2016. i 2017. godini, dok je u 2010., 2011. i 2019. praktično ostvarena 100% raspoloživost.



Slika 4-1 Dnevna raspoloživost podataka proizvodnje VE u % tijekom razmatranog perioda

Prošireni podatkovni set korišten je kao ulaz u programski paket windPRO [99], preko kojega je generirana vremenska serija proizvodnje VE. U vjetroelektrani razmatrano je 65 VA nazivne snage 4,8 MW i 4 VA snage 4,3 MW, što daje ukupnu instaliranu snagu VE 329,2 MW. Generirana vremenska serija, odnosno izlaz iz programskog paketa windPRO obuhvaća zavjetrinske gubitke s obzirom na stvarnu lokaciju VA i karakteristike terena korištenjem WAsP (modul windPRO programskog paketa) ekstrapolacijskog modela.

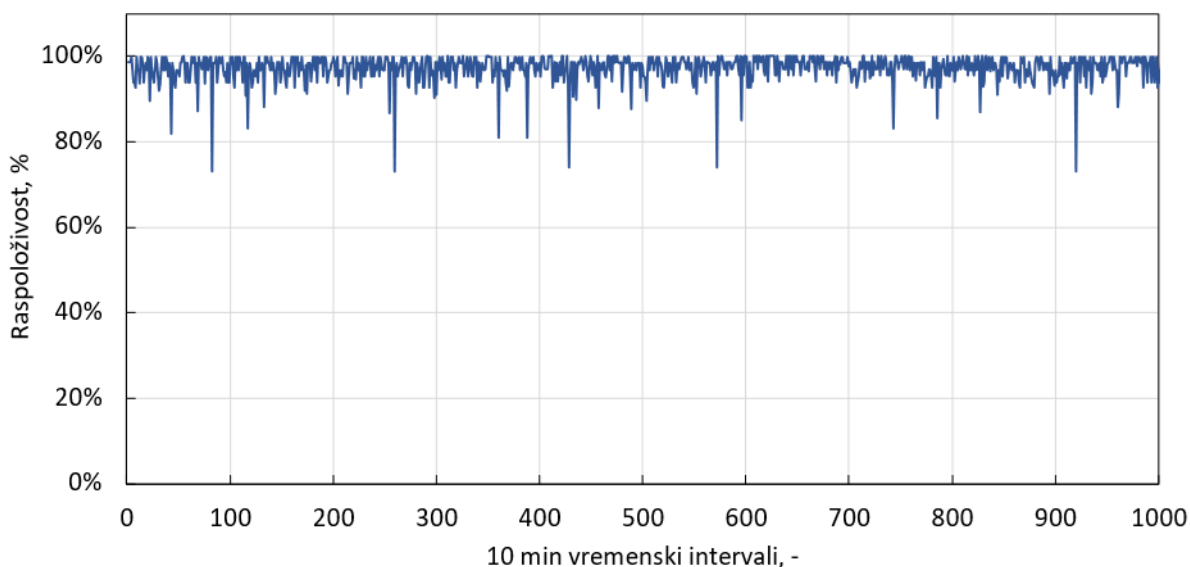
4.2 Stohastički model raspoloživosti i podbačaja VE

U generiranoj vremenskoj seriji iz windPRO programskog paketa uzeti su u obzir samo zavjetrinski gubici budući da su uključeni u proračun performansi svakog od VA s obzirom na lokaciju u VE. Drugi gubici poput gubitaka zbog neraspoloživosti, odbačene proizvodnje zbog ograničenja priključne snage, podbačaja i električnih gubitaka obično se daju u postotnom iznosu te se množe s proizvodnjom VE, a kao rezultat se dobiva realističnija proizvodnja koja obuhvaća odgovarajuće komponente gubitaka. Iako je prethodno valjani postupak, za potrebe proračuna u ovom poglavlju primijenjen je napredniji postupak u kojem su razvijeni stohastički modeli neraspoloživosti i podbačaja VE.

U prvoj dijelu, razvijen je pojednostavljeni stohastički model raspoloživosti VE. Model se temelji na operativnim podacima raspoloživosti vjetroelektrane „C“ (potpoglavlje 5.2.1) u periodu 13.7.2019. do 1.1.2021. u 10 min rezoluciji. Preuzeti podaci sa svakog VA korišteni su za generiranje četiri različite statističke razdiobe koje opisuju vjerojatnost pojave odgovarajuće raspoloživosti za raspone brzine vjetra [0, 10 m/s], [10 m/s, 15 m/s], [15 m/s, 20 m/s] i [20 m/s, 25 m/s].

Rezultirajuće distribucije nisu uvijek diskretne s obzirom na broj VA u VE, tj. raspoloživost se ne javlja kao cijeli broj raspoloživih VA budući da VA može biti nedostupan tijekom određenog dijela 10 minutnog intervala. Ipak, takvi slučajevi parcijalnih neraspoloživosti se javljaju mnogo rjeđe u odnosu na neraspoloživost tijekom cijelog 10 minutnog intervala.

Vremenska serija raspoloživosti dobiva se uzorkovanjem iz pripadajuće distribucije za svaku brzinu vjetra. Raspoloživost dobivenog modela prikazana je na slici 4-2.



Slika 4-2 Vremenska serija raspoloživosti VA

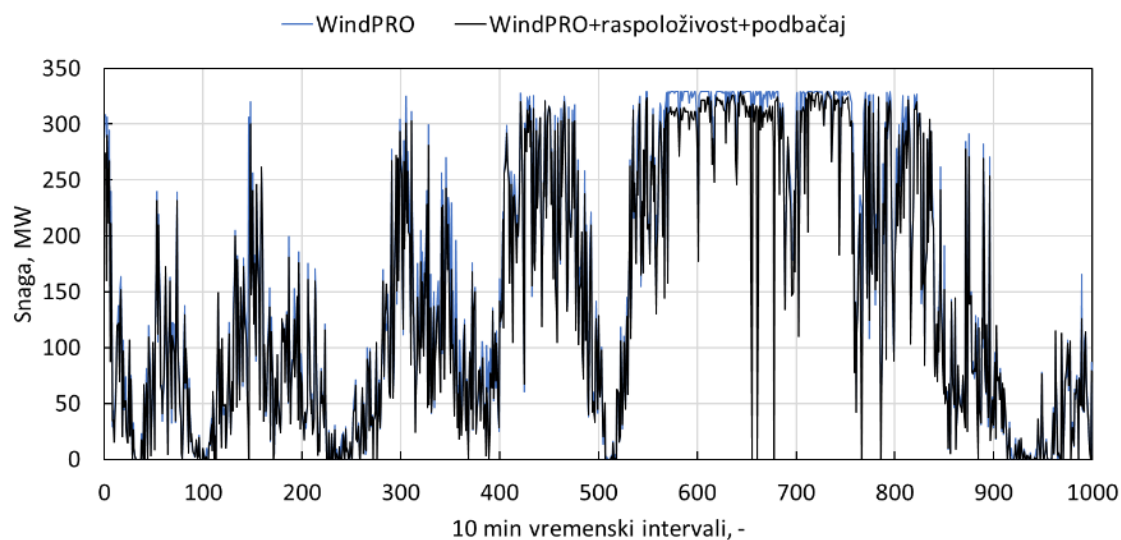
U drugom dijelu modela, napravljen je model podbačaja (engl. *underperformance*) koji je također zasnovan na operativnim podacima VE „C“ i u istom periodu. Izračunata je prosječna izlazna snaga VA na VE u svakom 10 min intervalu, pri čemu su odbačene sve vjetroturbine koji nisu bili u pogonu tijekom 10 min intervala. Tako dobivena prosječna snaga VA uspoređena je s proračunatom garantiranom snagom krivulje snage VA. Brzina vjetra je podijeljena u diskretne korake po 0,5 m/s, od 3 m/s do 25 m/s. Ako se prosječna snaga VA podijeli s garantiranom krivuljom snage i izrazi u postotnim iznosima za svaki

vremenski korak, koju možemo nazvati koeficijent snage, moguće je dobiti funkciju vjerojatnosti po pojedinim vremenskim koracima.

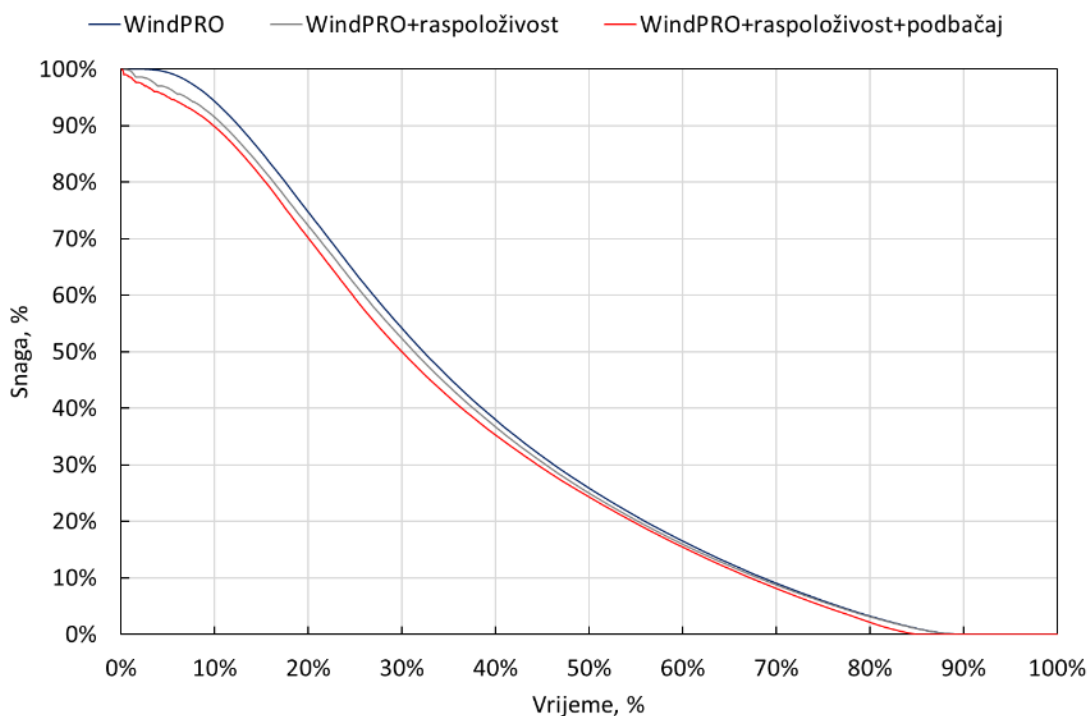
Razvijeni stohastički model, koji se sastoji od modela raspoloživosti i modela podbačaja u osnovi se zasniva na sljedećim koracima:

- Za ulazne brzine vjetra u 10 min intervalu, određuje se pripadajući raspon brzine [0, 10 m/s], [10 m/s, 15 m/s], [15 m/s, 20 m/s] ili [20 m/s, 25 m/s] te se na temelju distribucije pridjeljuje odgovarajuća raspoloživost.
- Istoj brzini vjetra pridjeljuje se koeficijent snage u %, na temelju distribucije koja odgovara rasponu brzine kojoj ulazna brzina pripada (korak 0,5 m/s).
- Vremenska serija snage iz programskog paketa windPRO se množi s raspoloživosti i koeficijentom snage, te kao rezultat dobiva se proizvodnja VE.

Generirane vremenske serije iz windPRO-a (prije korekcije sa stohastičkim modelima) prije i nakon korekcije s modelima prikazani su na slici 4-3. Krivulje trajanja vremenskih serija, uz nadodanu korekciju s raspoloživosti bez korekcije podbačaja prikazane su na slici 4-4. Za razliku od jednostavne korekcije modela s konstantnim postotnim iznosom neovisno o proizvodnji VE, ovakvi stohastički modeli daju realističniju proizvodnju VE. Kao što je vidljivo na slici 4-3, veća neraspoloživost VA u VE pri većim brzinama vjetra uzrokovat će veće postotno smanjenje proizvodnje kod većih snaga u odnosu na periode s manjom proizvodnjom.



Slika 4-3 Generirane vremenske serije iz windPRO-a i nakon korekcije sa stohastičkim modelima raspoloživosti i podbačaja



Slika 4-4 Krivulja trajanja vremenskih serija izlazne snage iz (a) windPRO, (b) windPRO uz korekciju s modelom raspoloživosti i (c) windPRO uz korekciju s modelom raspoloživosti i podbačaja

4.3 Ulazni podaci za SE

Modeliranje proizvodnje SE provedeno je u programskom paketu PVSyst. Podaci zračenja, temperature zraka i brzine vjetera preuzete su iz SOLARGIS baze podataka na planiranoj lokaciji VE (satelitski podaci). Vremenska rezolucija podataka zračenja je 15 min, ali s obzirom na ograničenje programskog paketa PVSyst, zračenje se usrednjuje na 1 h rezoluciju prije proračuna proizvodnje. S obzirom da je riječ o satelitskim podacima, ostvarena je 100% raspoloživost podataka SE.

Razmatrana je sunčana elektrana s fiksnom konstrukcijom i bifacijalnim FN modulima, koji su postavljeni pod kutem 20° uz azimut 0° (orijentacija prema jugu). Proračun je proveden za instaliranu snagu elektrane 100 MWp uz nazivnu AC snagu 86,98 MW, što odgovara DC/AC omjeru 1,15. Ukupni PR faktor iznosi 85,85%, a specifična proizvodnja 1705 kWh/kWp/godišnje.

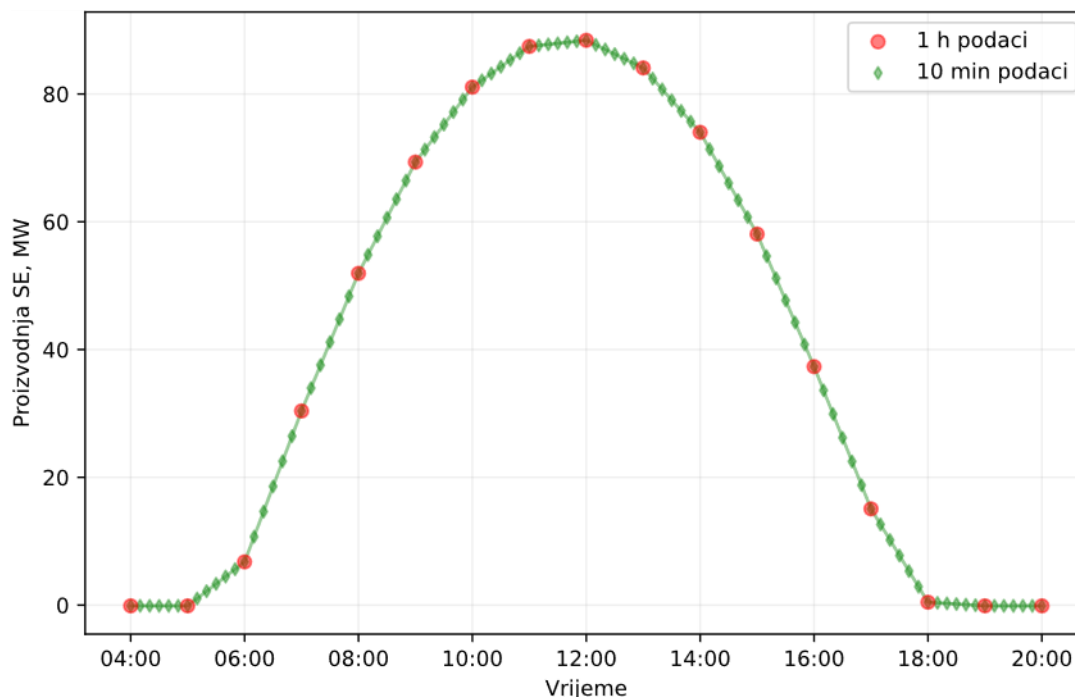
Bitno je napomenuti da su podaci preuzeti tijekom perioda koji se poklapa s periodom u kojem je dostupna proizvodnja VE, što je osnova za proračun odbačene proizvodnje. Jasno da bi odabir različitih perioda isključio komplementarnost proizvodnje VE i SE, što bi u potpunosti rezultiralo pogrešnom procjenom odbačene proizvodnje.

Budući da je vremenska serija proizvodnje VE dostupna u 10 min rezoluciji, a za SE u 1 h rezoluciji, potrebno je uskladiti vremenske serije na jedan od dva načina:

- usrednjavanje vremenske serije proizvodnje VE u 10 min rezoluciji na 1 h rezoluciju ili
- interpolacija 1 h podataka na 10 min rezoluciju.

Za analizu odbačene proizvodnje u ovom poglavlju, korištena je varijanta linearne interpolacije, čime je analiza provedena u 10 min rezoluciji. Ovakav pristup je superiorniji u odnosu na primjenu usrednjavanja s obzirom da se gubi manje informacije o fluktuacijama snage VE. Za svaki 1 h interval dobiva se šest novih

10 min vrijednosti. Primjer provedbe linearne interpolacije na vremenskom intervalu od 16 h demonstriran je na slici 4-5.



Slika 4-5 Linearna interpolacija 1 h podataka proizvodnje SE na 10 min rezoluciju

4.4 Varijante proračuna i ostali ulazni podaci

Odbačena proizvodnja u hibridnoj elektrani ovisi o omjeru instalirane snage hibridne elektrane i priključne snage, udjelu instalirane snage VE/SE u hibridnoj elektrani, veličini VE i SE (broj i snaga VA u VE, površina SE), stupnju komplementarnosti proizvodnje VE i SE na lokaciji, specifičnostima tehnologije (fiksna/zakretna konstrukcija, string/centralni inverteri, inerciji VA) i lokaciji (prostorni raspored FN modula i VA u VE, kompleksnost terena) te klimatskim uvjetima.

S obzirom da je analiza zasnovana na jednoj lokaciji, utjecaj stupnja komplementarnosti i klimatskih uvjeta na odbačenu proizvodnju nije razmatran. Razmatranja su također ograničena na SE s fiksnom konstrukcijom. Pretpostavlja se da preostali utjecajni faktori poput veličine VE i SE, prostornog rasporeda modula i inercijskih konstanti VA nemaju bitan utjecaj na odbačenu proizvodnju pri niskim vremenskim rezolucijama poput korištenih 10 min za VE i 1 h za SE.

U nastavku, odbačena proizvodnja je razmotrena u tri slučaja:

1. Osnovna varijanta s VE instalirane snage 329,2 MW i SE instalirane snage 100 MWp uz priključnu snagu 300 MW. U ovoj varijanti detaljnije će se razmotriti odbačena proizvodnja, karakteristike odbačene proizvodnje kao i pojedina statistička svojstva iste.
2. Proračun odbačene proizvodnje za raspon instalirane snage SE 50 MWp – 390 MWp uz korak 20 MW, a sve uz nepromijenjenu instaliranu snagu VE 329,2 MW i priključnu snagu 300 MW. Cilj je ispitivanja utvrditi kako će odbačena proizvodnja ovisiti o udjelu SE nakon hibridizacije, a dobivena karakteristika ovisnosti odbačene proizvodnje o instaliranoj snazi SE može se koristiti za odabir ciljane snage SE.

3. Proračun odbačene proizvodnje uz promjenu udjela SE u hibridnoj elektrani za različite priključne snage. U ovoj varijanti, instalirana snaga VE i SE se skalira kako bi se ispitaio utjecaj udjela VE i SE u hibridnoj elektrani i to u četiri varijante priključne snage, tj. 60%, 70%, 80% i 90% instalirane snage hibridne elektrane.

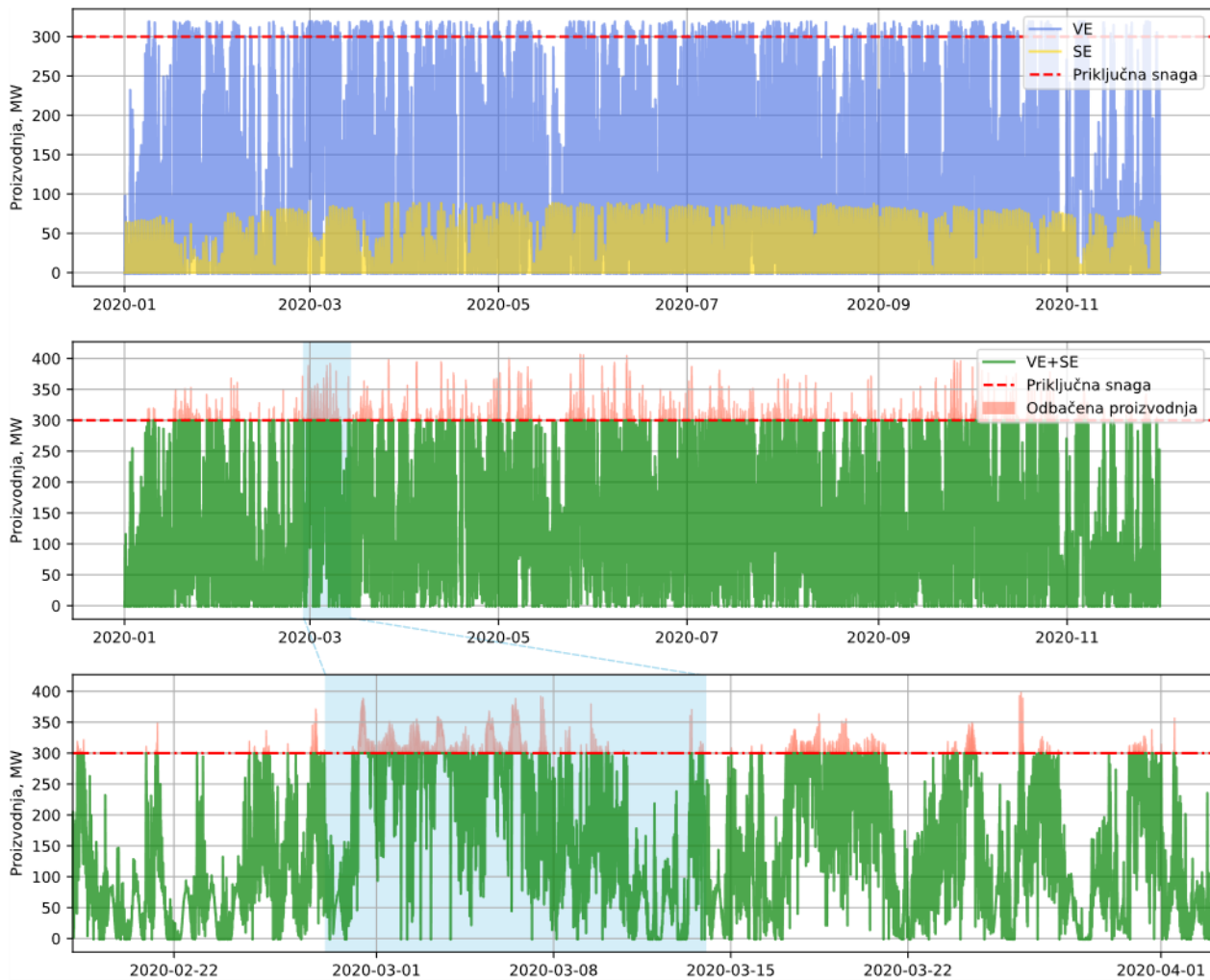
Potrebno je napomenuti da se skaliranje snage provodi pojednostavljenom procedurom, tj. množenjem instaliranih snaga u osnovnoj varijanti (329,2 MW za VE i 100 MWp za SE) s odgovarajućom konstantom kako bi se dobio traženi udio SE u hibridnoj elektrani. Pritom se zanemaruje utjecaj veličine VE i SE odnosno efekta poravnanja. Navedeni utjecaj će se detaljnije ispitati i razraditi u poglavljima 5 i 6.

Topologija modela hibridne elektrane odgovara onoj sa zajedničkim AC sabirnicama (SN sabirnice u ovom slučaju) prikazanoj na slici 3-1, uz napomenu da gubici u energetskom transformatoru SN/VN nisu uzeti u obzir.

4.5 Analiza odbačene proizvodnje u osnovnoj varijanti

Prikaz vremenskih serija proizvodnje VE, SE, VE + SE, te odbačene proizvodnje dan je na slici 4-6 za 2020. godinu. Nakon hibridizacije, vremenski periodi u kojima se pojavljuje odbačena proizvodnja prikazani su u crvenoj boji, a riječ je o periodima u kojim je moguća proizvodnja VE + SE na pragu mreže veća od priključne snage hibridne elektrane. Takvi periodi su u razmatranom slučaju relativno rijetki, a posljedica su dijelom zbog same VE (instalirana snaga VE je veća od priključne snage pa se odbačena proizvodnja javlja i prije hibridizacije), a dijelom i zbog hibridizacije sa SE.

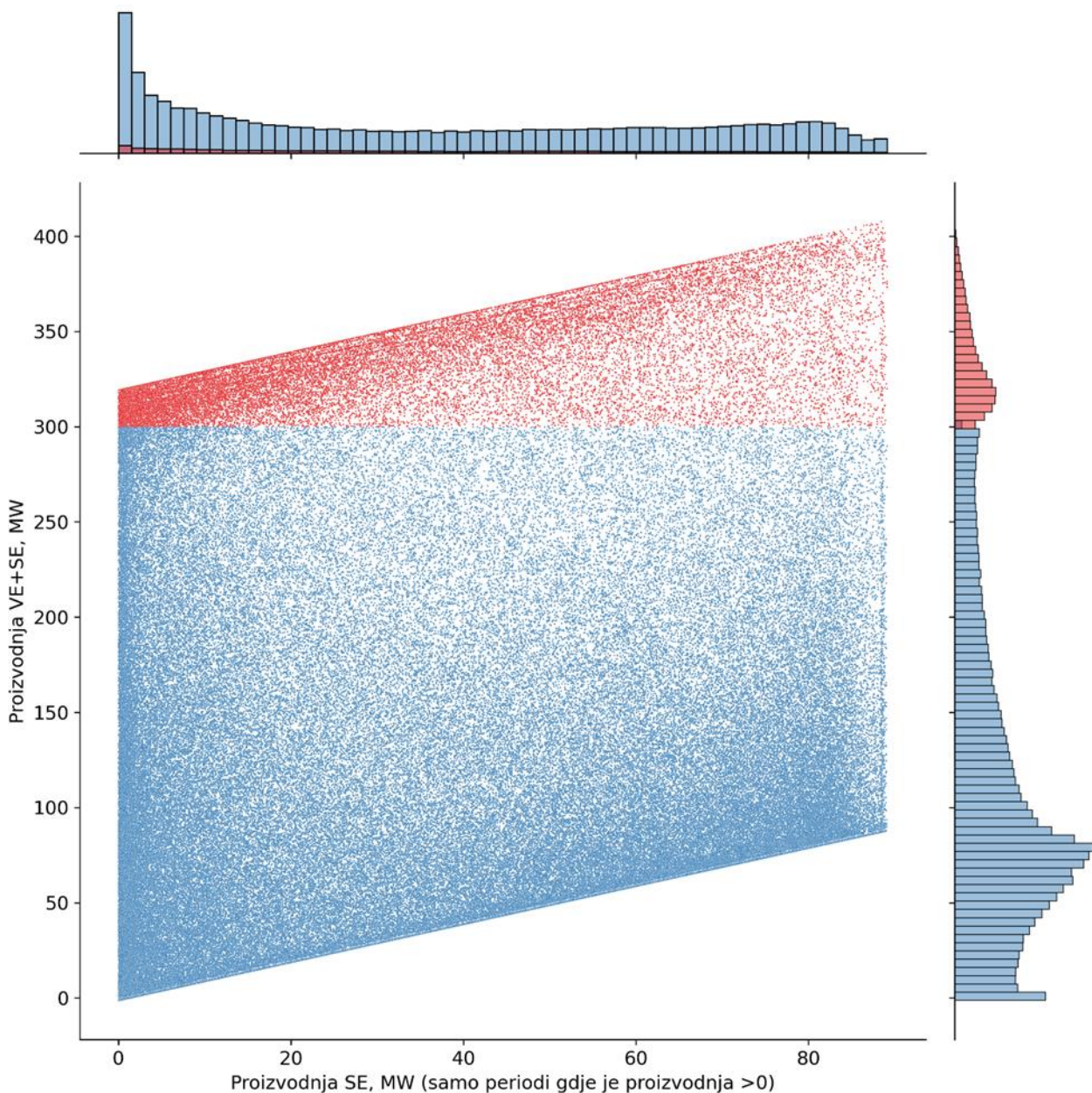
Ukupni iznos odbačene proizvodnje u jednoj godini je 96007,3 MWh, što u postotnom iznosu u odnosu na proizvodnju hibridne elektrane iznosi 1,57%. Prije hibridizacije sa SE, odbačena proizvodnja VE iznosila je 33014,6 MWh pa je doprinos SE odbačenoj proizvodnji 62992,7 MWh odnosno 1,03% ukupne proizvodnje hibridne elektrane.



Slika 4-6 Vremenski nizovi proizvodnje VE (329,2 MW) i SE (100 MWp), objedinjene proizvodnje VE + SE te odbačene proizvodnje tijekom jedne godine

Na slici 4-7 prikazan je raspršeni dijagram ovisnosti proizvodnje hibridne elektrane o proizvodnji SE za kompletni promatrani period 2010 – 2020. Budući da je proizvodnja SE više od polovice dana jednaka nuli, razmatrani su samo vremenski intervali u kojima je proizvodnja SE veća od 0, čime se dobiva homogeniji oblik distribucije. Na pojedinim osima prikazane su i pripadajuće empirijske marginalne distribucije gustoće vjerojatnosti VE + SE i SE, pri čemu je distribucija prikazana zasebno za proizvedenu električnu energiju (plavo) i odbačenu proizvodnju (crveno). Gustoća crvenih točaka na raspršenom dijagramu daje uvid u učestalost pojave odbačene proizvodnje za odgovarajuću proizvodnju SE odnosno VE + SE.

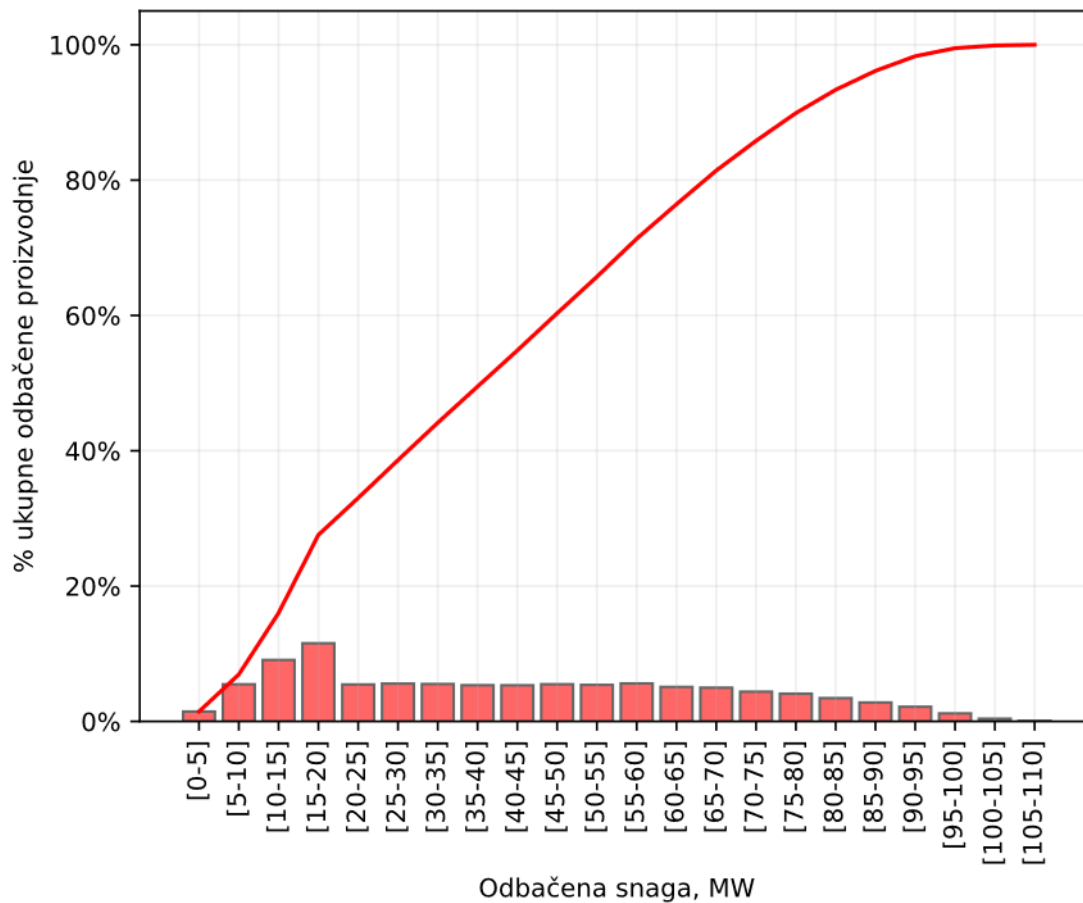
Najveća gustoća crvenih točaka se javlja u dijelu kada je proizvodnja SE bila relativno mala, cca do 20 MW, a proizvodnja VE visoka (mora biti takva da je zbirna proizvodnja VE + SE veća od priključne snage). Takvi periodi se općenito javljaju tijekom jutarnjih sati i poslijepodnevni sati, npr. između 7 h – 9 h i 15 – 17 h. Nasuprot tome, periodi kada je moguća proizvodnja VE + SE bila veća od npr. 370 MW su rijetki, što se i uočava u manjoj gustoći točaka na raspršenom dijagramu. Proizvodnja hibridne elektrane na pragu mreže veća od 370 MW moguća je samo u periodima između 10 h – 14 h. Iako su takvi događaji rijetki, isti mogu značajno energetske utjecati na iznos odbačene proizvodnje.



Slika 4-7 Raspršeni dijagram proizvodnje hibridne elektrane u odnosu na proizvodnju SE (100 MW) s pripadajućim marginalnim distribucijama

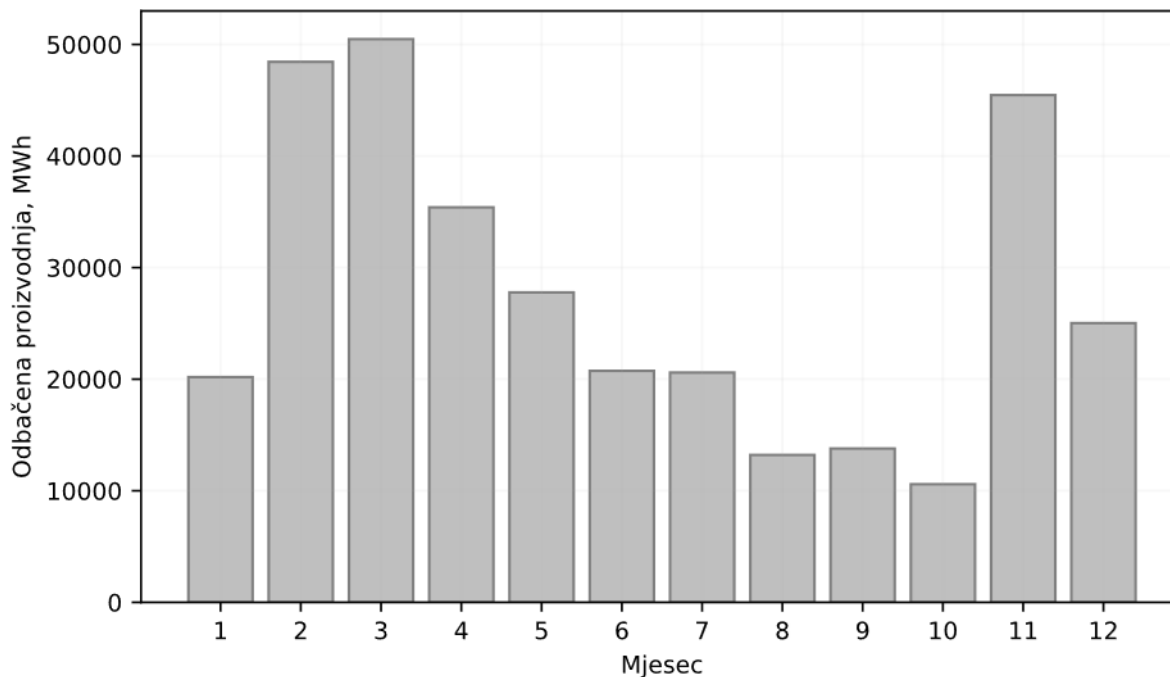
Kako bi se utvrdio doprinos raspona iznosa odbačene snage ukupnoj odbačenoj proizvodnji, kreiran je graf na slici 4-8. Iznosi odbačene proizvodnje podijeljeni su u 22 intervala jednake duljine (5 MW), a za svaki interval izračunat je doprinos ukupnoj odbačenoj proizvodnji. U konačnici, izračunata je kumulativna suma odbačene proizvodnje po intervalima i izražena u postocima ukupne odbačene proizvodnje, te je ista prikazana u ovisnosti o intervalima odbačene proizvodnje.

Iznosi odbačene proizvodnje iznad 90 MW imaju svega 4% udjela u ukupnoj odbačenoj proizvodnji. Najveći doprinos imaju gubici 15 MW – 25 MW koji čine cca 20% ukupnih gubitaka.



Slika 4-8 Doprinos raspona odbačene snage ukupnoj odbačenoj proizvodnji

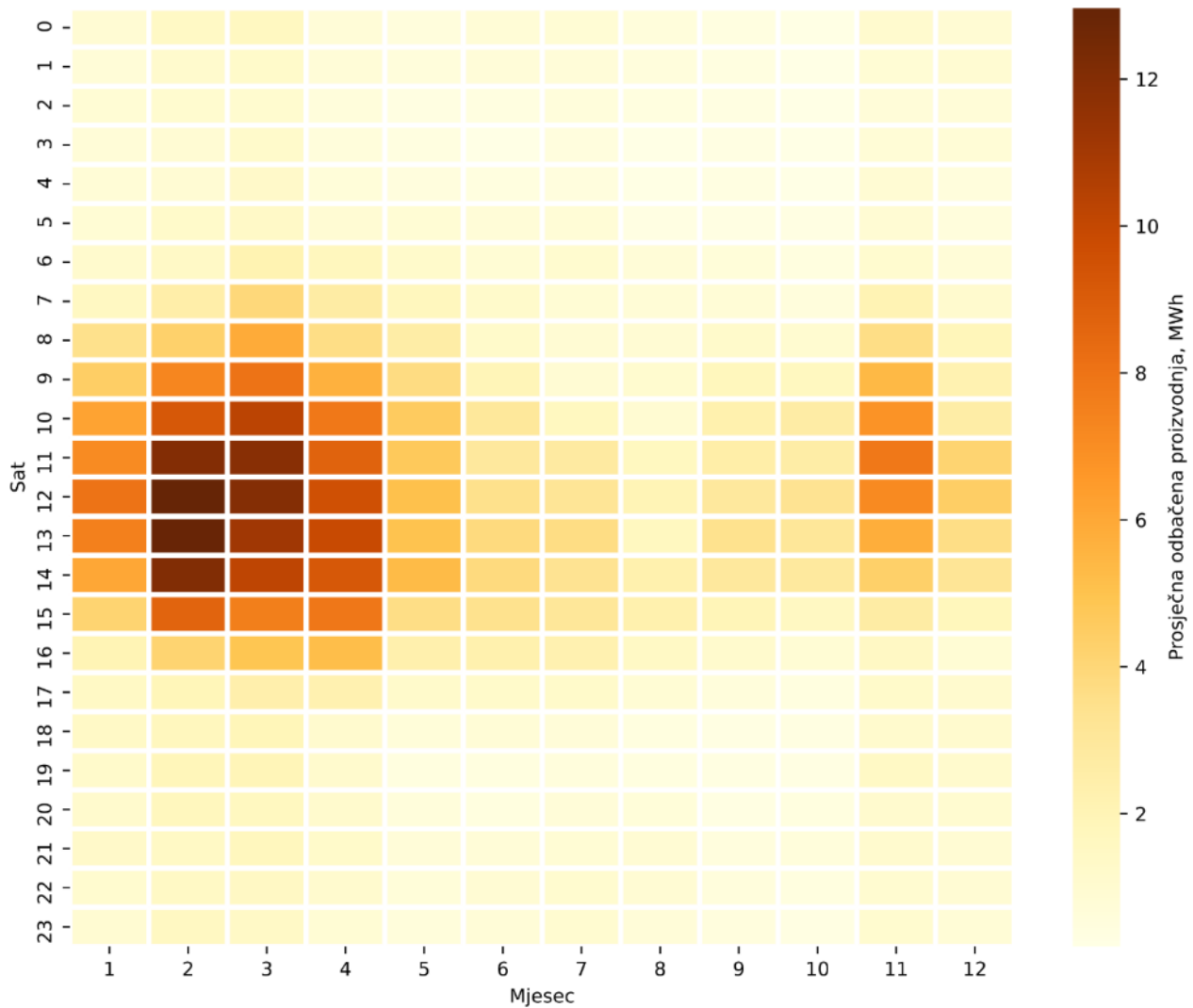
Slika 4-9 prikazuje iznos odbačene proizvodnje po mjesecima tijekom godina u kojima je raspoloživost podataka visoka (2010., 2011. i 2019.). U promatranom razdoblju najveća odbačena proizvodnja javlja se u ožujku, a slijede veljača i studeni. Tipično se maksimum ukupne odbačene proizvodnje i za ostale godine javlja u ožujku.



Slika 4-9 Prosječna odbačena proizvodnja po mjesecima tijekom razmatranog perioda trogodišnjeg perioda

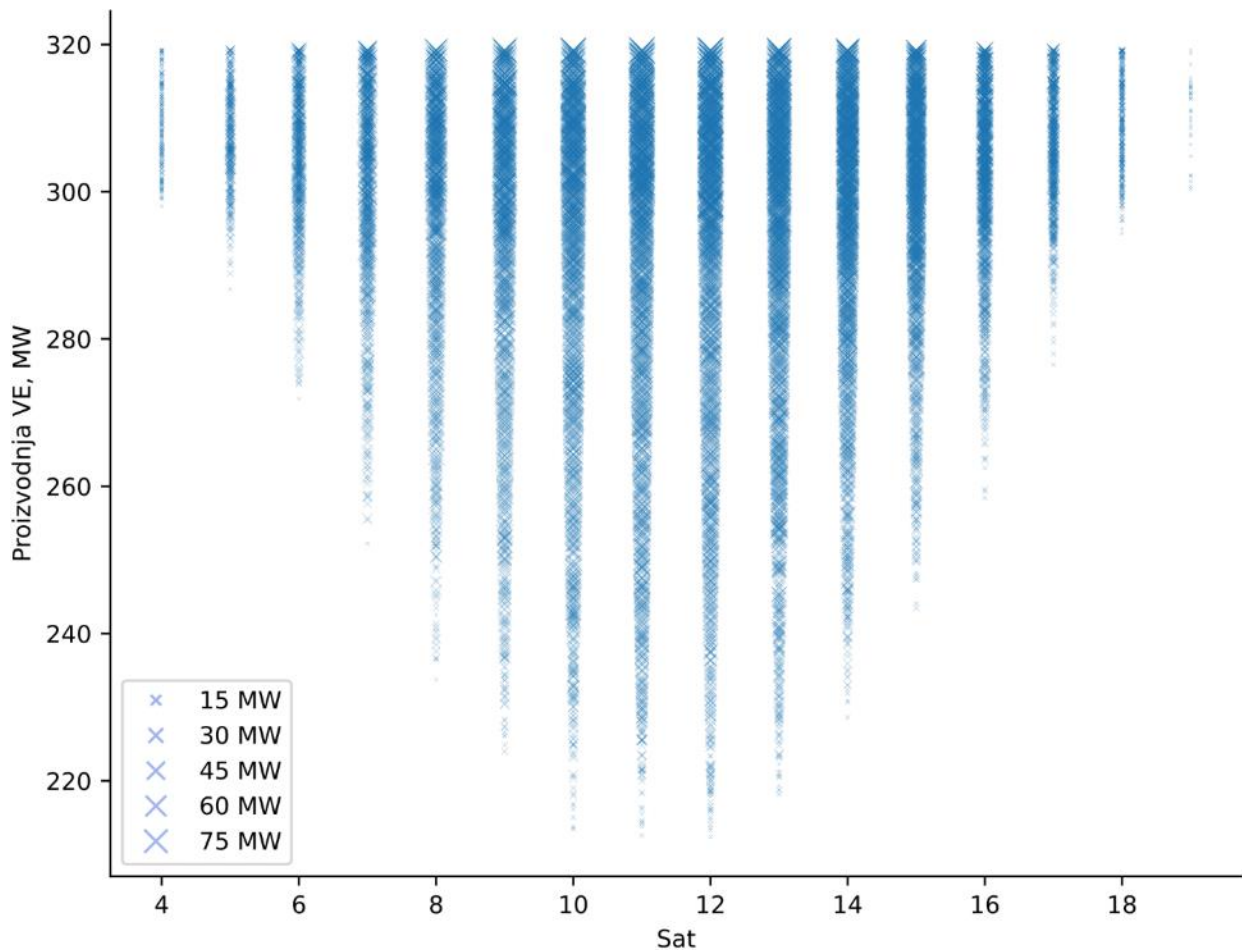
Na temelju slike 4-10 moguće je identificirati vremenske intervale kada se tijekom dana u pojedinim mjesecima pojavljivala odbačena proizvodnja, te njen prosječni iznos. Na dotičnoj lokaciji, najveća odbačena proizvodnja evidentirana je u periodu između veljače i travnja. Tipično, maksimalne vrijednosti odbačene proizvodnje zabilježene su između 9 i 14 sati, što je i očekivano s obzirom na proizvodnju SE. Povećanje odbačene proizvodnje u periodima između veljače i travnja je povezano s postojanjem značajnijeg vjetro potencijala u tim mjesecima, dok je proizvodnja SE još uvijek izražena zbog većeg broja sunčanih dana u odnosu na studeni, prosinac i siječanj.

Najmanji prosječni iznosi odbačene proizvodnje po satima su tijekom ljeta i rane jeseni, gdje zbog manjeg vjetro potencijala rijetko dolazi do pojave većih iznosa odbačene proizvodnje. Bitno je napomenuti da je učestalost pojavljivanja odbačene proizvodnje tijekom godine specifična za pojedinu lokaciju i ne može se generalizirati. Pojavnost predmetnih gubitaka primarno će ovisiti o karakteristikama vjetra na lokaciji, odnosno o broju vjetrovitih dana i karakterističnom profilu proizvodnje VE tijekom popodnevnih sati.



Slika 4-10 Prosječni iznos odbačene proizvodnje po satima tijekom godine

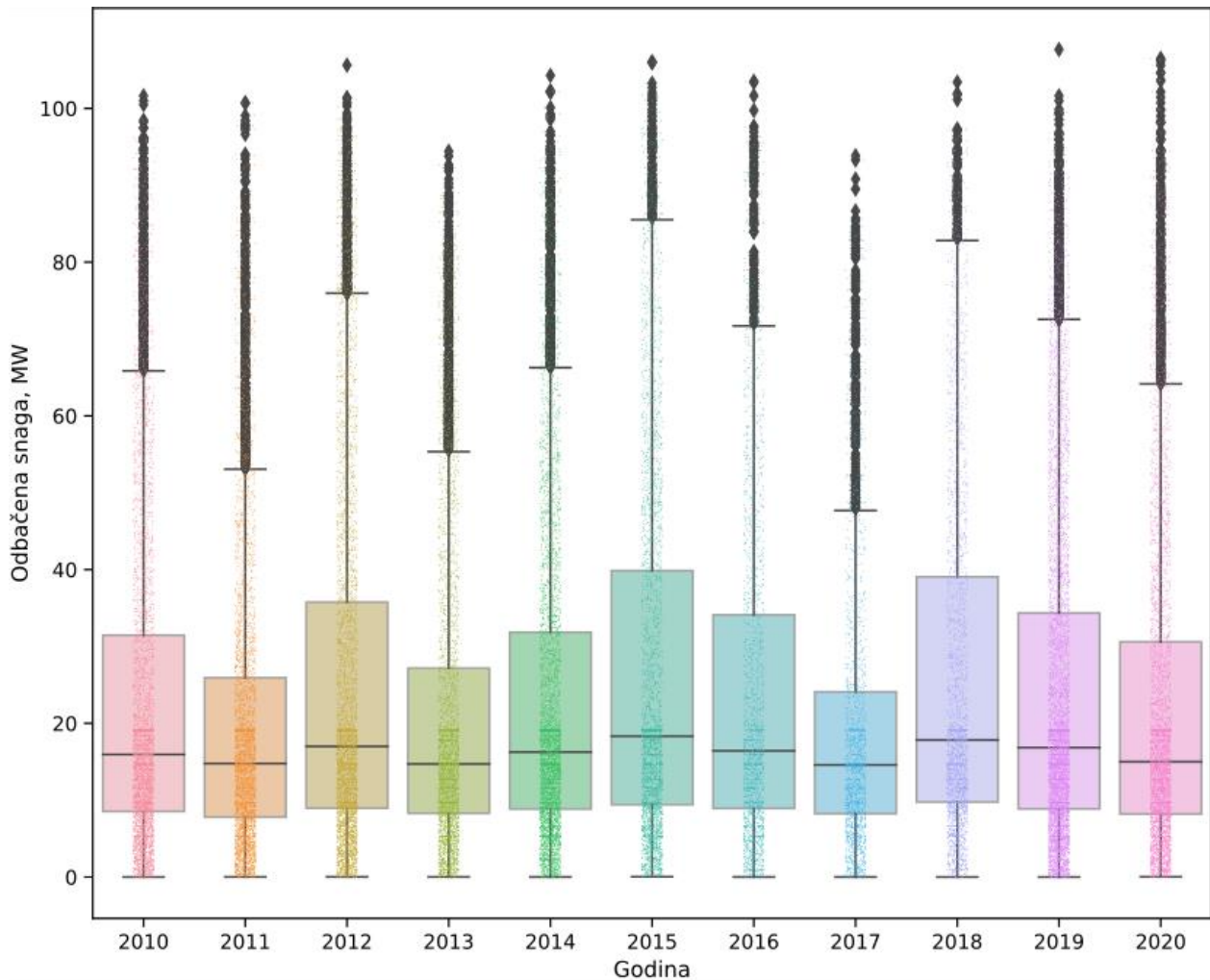
Učestalost pojave i iznos odbačene proizvodnje može se prikazati na način da se razmatra s obzirom na iznos proizvodnje VE u pojedinim satima u danu. Navedeni prikaz dan je na slici 4-11. Odbačena proizvodnja javlja se samo u rasponu između 5 h i 17 h, iako su iznosi na rubovima intervala (5 h i 17 h) praktički zanemarivi. Iznosi odbačene proizvodnje >50 MW mogu se javiti samo u periodu od 9 h do 14 h, a najveća učestalost takvih događaja je između 10 h i 12 h.



Slika 4-11 Učestalost i iznos odbačene proizvodnje tijekom dana s obzirom na proizvodnju VE

Distribucija godišnje odbačene proizvodnje tijekom razdoblja 2010. – 2020. prikazana je na slici 4-12 pomoću tzv. kutijastog dijagrama (engl. *box plot* ili *box and whisker plot*). Kutijasti dijagram se sastoji od sljedećih dijelova:

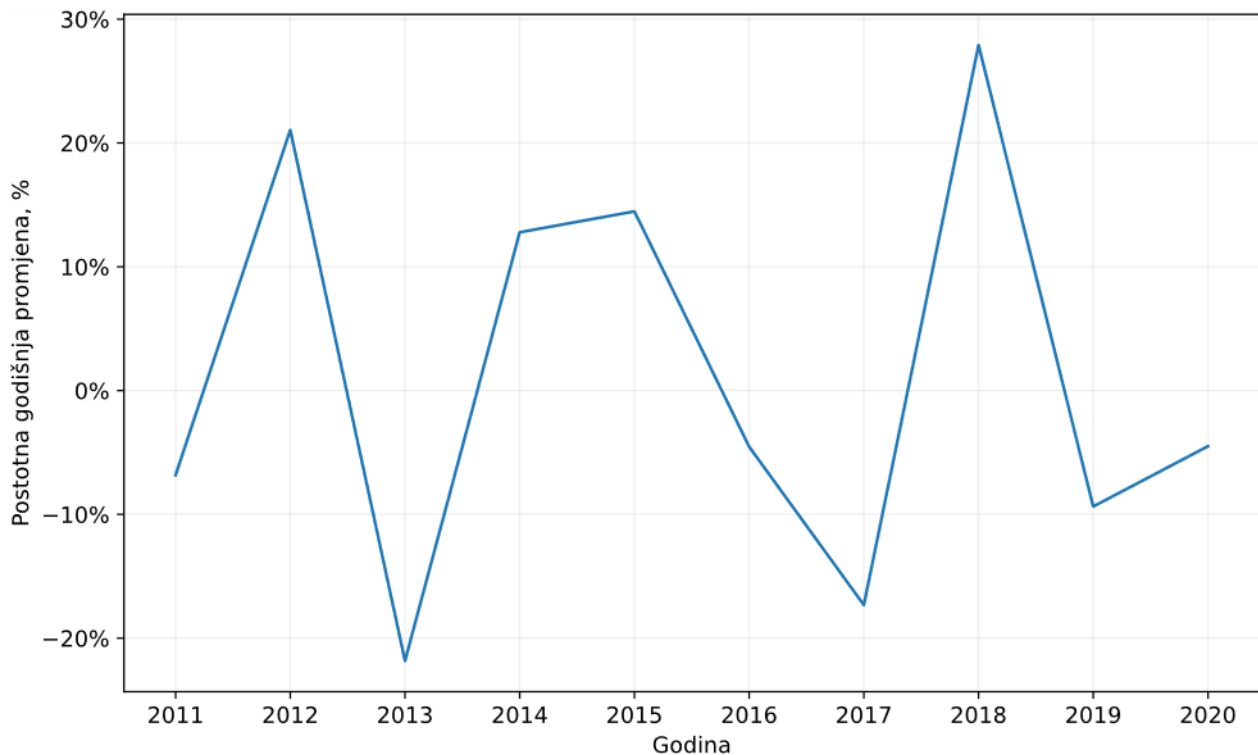
- Pravokutnika odnosno srednjeg dijela koji prikazuje podatke donjeg i gornjeg kvartila, tj. raspon između prvog kvartila (Q1) i trećeg kvartila (Q3). Njime je obuhvaćeno područje središnjih 50% podataka. Linija unutar kutije predstavlja medijan ili srednju vrijednost, koja je drugi kvartil (Q2). Na slici 4-3, prikazan je medijan, dok je srednja vrijednost izostavljena.
- Gornje i donje horizontalne linije se nazivaju „whiskers“, a protežu se do maksimuma ili minimuma podataka ili su definirani korištenjem interkvartilnog raspona (IQR) kao na slici 4-12. U potonjem slučaju, gornja crta definirana je vrijednosti $Q3 + 1,5 * IQR$, a donja crta $Q1 - 1,5 * IQR$, gdje je $IQR = Q3 - Q1$.
- „Outlieri“ ili izuzeci su vrijednosti koje premašuju gornje i donje horizontalne linije, a na slici 4-12 prikazane su crnim točkama.



Slika 4-12 Varijacije distribucije odbačene proizvodnje tijekom desetgodišnjeg perioda

Ako se iz prethodne distribucije odbačene proizvodnje odaberu prosječne godišnje vrijednosti odbačene proizvodnje, može se izračunati postotna godišnja promjena odbačene proizvodnje što je prikazano na slici 4-13. Postotna promjena računata je kao razlika između prosjeka susjednih godina, npr. 2011. u odnosu na 2010., pri čemu je takva razlika pridijeljena 2011. godini na osi apcisa. Jednako vrijedi i za ostale godine.

Razlog zašto je korištena prosječna vrijednost, a ne ukupna vrijednost odbačene proizvodnje, proizlazi iz većeg broja neraspodivnosti podataka. Potrebno je uzeti i u obzir da godine u kojima nema pojedinih mjeseci mogu utjecati na prosjek budući da mogu biti izbačeni mjeseci kada odbačena proizvodnja karakteristično odstupa od prosjeka. Zbog navedenog razloga relevantniji rezultati su dobiveni između 2010. i 2011., 2011. i 2012. te 2019. i 2020. godine. Na slici 4-13 postotne godišnje promjene za prethodne periode iznose -6,8%, 21,0% te -4,4%, respektivno. Varijacije prosječne proizvodnje VE i SE u tim istim periodima dane su u tablici 4-1. Smanjenje prosječne proizvodnje VE i SE praćeno je smanjenjem odbačene proizvodnje, i obratno. Međutim, na temelju dostupnih podataka ne postoji jasna zakonitost između promjena, tj. ne može se utvrditi koliko će povećanje prosječne proizvodnje imati utjecaja na odbačenu proizvodnju, što je očekivano s obzirom da odbačena proizvodnja ovisi o vjerojatnosti pojave istovremene visoke proizvodnje VE i SE.



Slika 4-13 Postotna promjena prosječne godišnje odbačene proizvodnje

Tablica 4-1 Godišnje varijacije proizvodnje VE, SE i odbačene proizvodnje tijekom godina visoke raspoloživosti proizvodnje VE

Prijelaz godine	Varijacije proizvodnje VE	Varijacije proizvodnje SE	Varijacije odbačene proizvodnje
2010. – 2011.	-4,2%	1,3%	-6,8%
2011. – 2012.	3,4%	3,5%	21,0%
2019. – 2020.	-6,7%	-2,9%	-4,4%

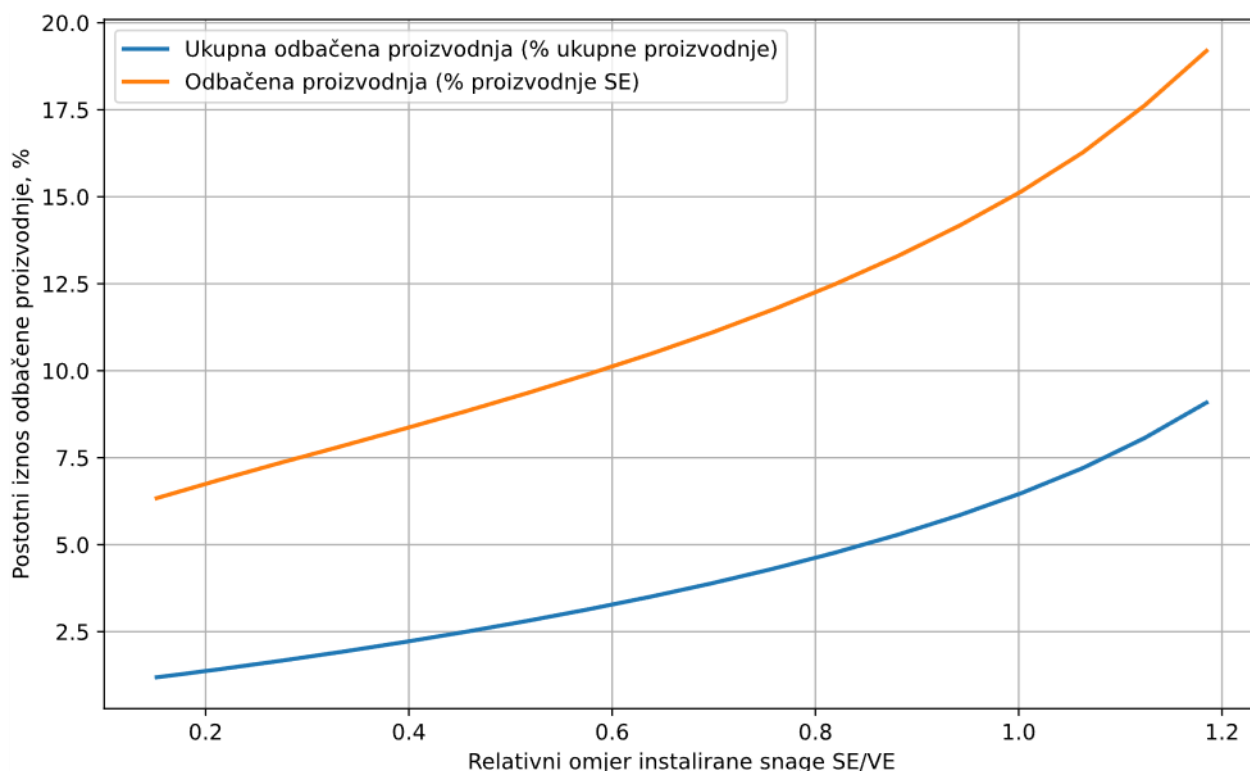
4.6 Ovisnost odbačene proizvodnje o instaliranoj snazi SE

Pri odabiru instalirane snage SE s kojom se planira proširiti postojeća VE, ključno je voditi računa o iznosu odbačene proizvodnje. U tu svrhu, najčešće se za danu priključnu snagu prikazuje graf ovisnosti odbačene proizvodnje o omjeru instalirane snage SE/VE (ili VE/SE). Takav grafički prikaz za konkretan slučaj prikazan je na slici 4-14. Na predmetnoj slici, odbačena proizvodnja izražena je u postotnom iznosu u odnosu na (a) ukupnu proizvodnju hibridne elektrane (prikazano plavom bojom) i (b) proizvodnju SE (prikazano narančastom bojom). Prikaz odbačene proizvodnje u varijanti (b) u ovom slučaju nije preporučen budući da je odbačena proizvodnja postojala i prije hibridizacije VE sa SE. Ovakav prikaz preporuča se samo kada je odbačena proizvodnja prije hibridizacije VE sa SE jednaka nuli, odnosno kada je vršna snaga VE manja od priključne snage.

Hibridizacija VE sa SE razmatrana je u rasponu omjera instalirane snage SE/VE od 0,1 (10%) do 1,182 (118%). S obzirom da je instalirana snaga VE jednaka 330 MW, razmatra se proširenje sa SE u rasponu od 33 MW do 390 MW s korakom 20 MW. Sa slike je moguće uočiti da odbačena proizvodnja iznosi:

- cca 6,5% ukupne proizvodnje VE + SE, odnosno cca 15,1% ukupne proizvodnje SE pri jednakom omjeru SE/VE (SE 330 MW i VE 329,2 MW);
- cca 2,8% ukupne proizvodnje VE + SE, odnosno cca 9,3% ukupne proizvodnje SE pri omjeru SE/VE od cca 50% (SE 170 MW i VE 329,2 MW).
- cca 1,4% ukupne proizvodnje VE + SE, odnosno cca 6,8% ukupne proizvodnje SE pri omjeru SE/VE od 20% (SE 70 MW i VE 329,2 MW).

Odabir instalirane snage SE za proširenje postojeće VE moguće je razmotriti iz više gledišta, a jedan od mogućih kriterija može biti prihvatljivi iznos odbačene proizvodnje. Općenito govoreći, povećanjem omjera SE/VE iznad 100%, kada je priključna snaga približno jednaka instaliranoj snazi VE, uzrokuje nagli porast odbačene proizvodnje. Dakle, odabir omjera SE/VE iznad 100% je teško opravdan. Odabir omjera SE/VE u rasponu od 20% do 50% praćen je relativno malim iznosima odbačene proizvodnje i općenito će dati zadovoljavajući rezultat s ekonomskog aspekta. Međutim, odabir manje instalirane snage može biti propuštena prilika za veću investiciju, odnosno oportunitetni trošak. Odabirom omjera iznad 50%, tj. u rasponu između 50% i 100%, odbačena proizvodnja je veća, ali takav pristup i dalje može biti prihvatljiv.

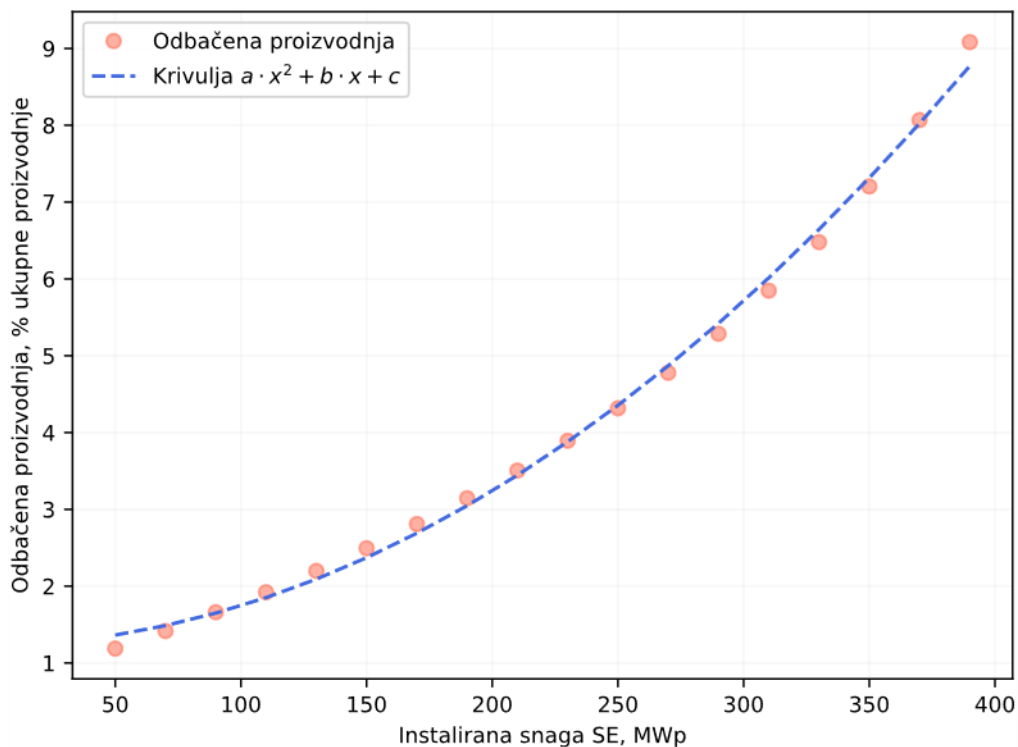


Slika 4-14 Ovisnost odbačene proizvodnje o omjeru instalirane snage SE/VE

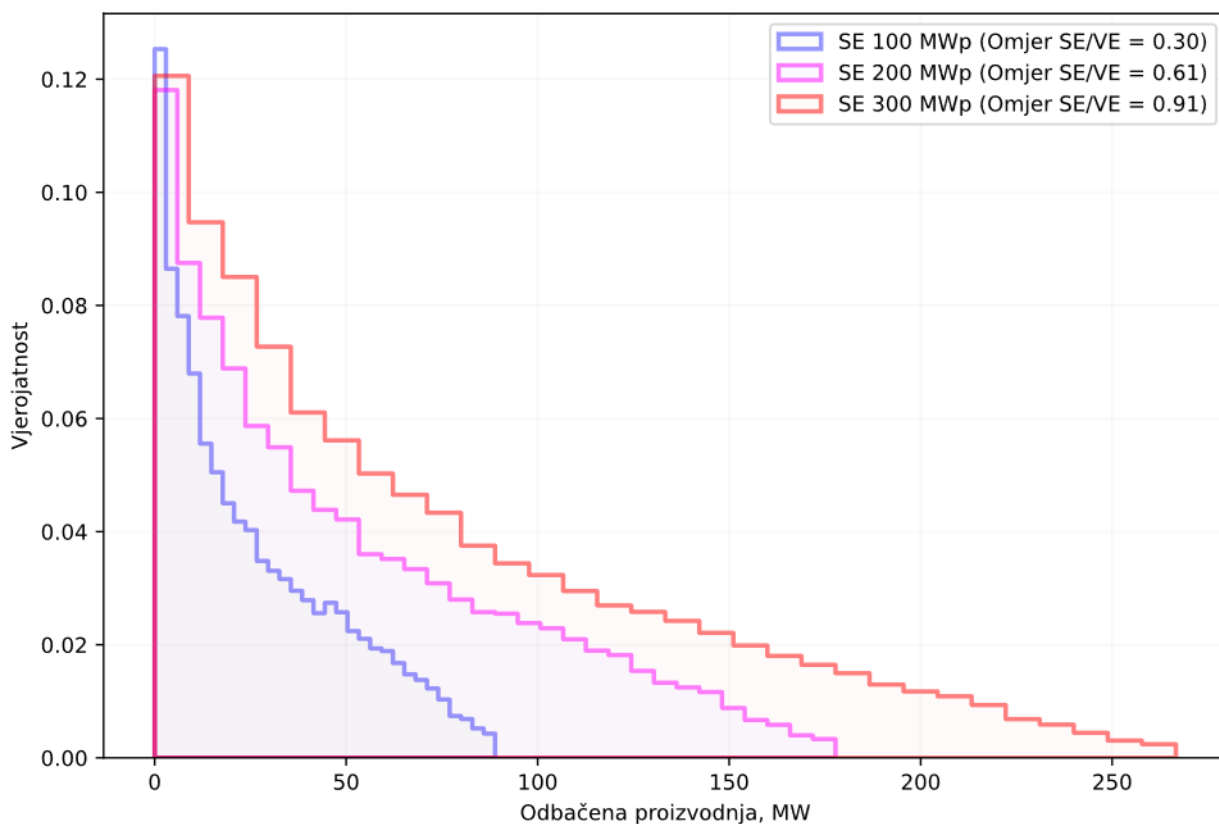
Dakle, riječ je o nelinearnoj karakteristici odbačene proizvodnje. Kada se razmatra odbačena proizvodnja u % ukupne proizvodnje hibridne elektrane, metodom najmanjih kvadrata moguće je utvrditi da se krivulja odbačene proizvodnje može približno opisati s kvadratnom funkcijom ($R^2=99,7\%$) u odabranom rasponu omjera SE/VE (Slika 4-15).

Empirijske distribucije odbačene proizvodnje prikazane su na slikama 4-16 i 4-17 za različite instalirane snage SE s kojima se proširuje postojeća VE. Sve distribucije prikazane su za fiksnu priključnu snagu iznosa 300 MW. Povećanjem instalirane snage SE, povećava se vjerojatnost pojave manjih iznosa odbačene proizvodnje, a proširuje se raspon mogućih iznosa odbačene proizvodnje. Teorijski maksimalna vrijednost

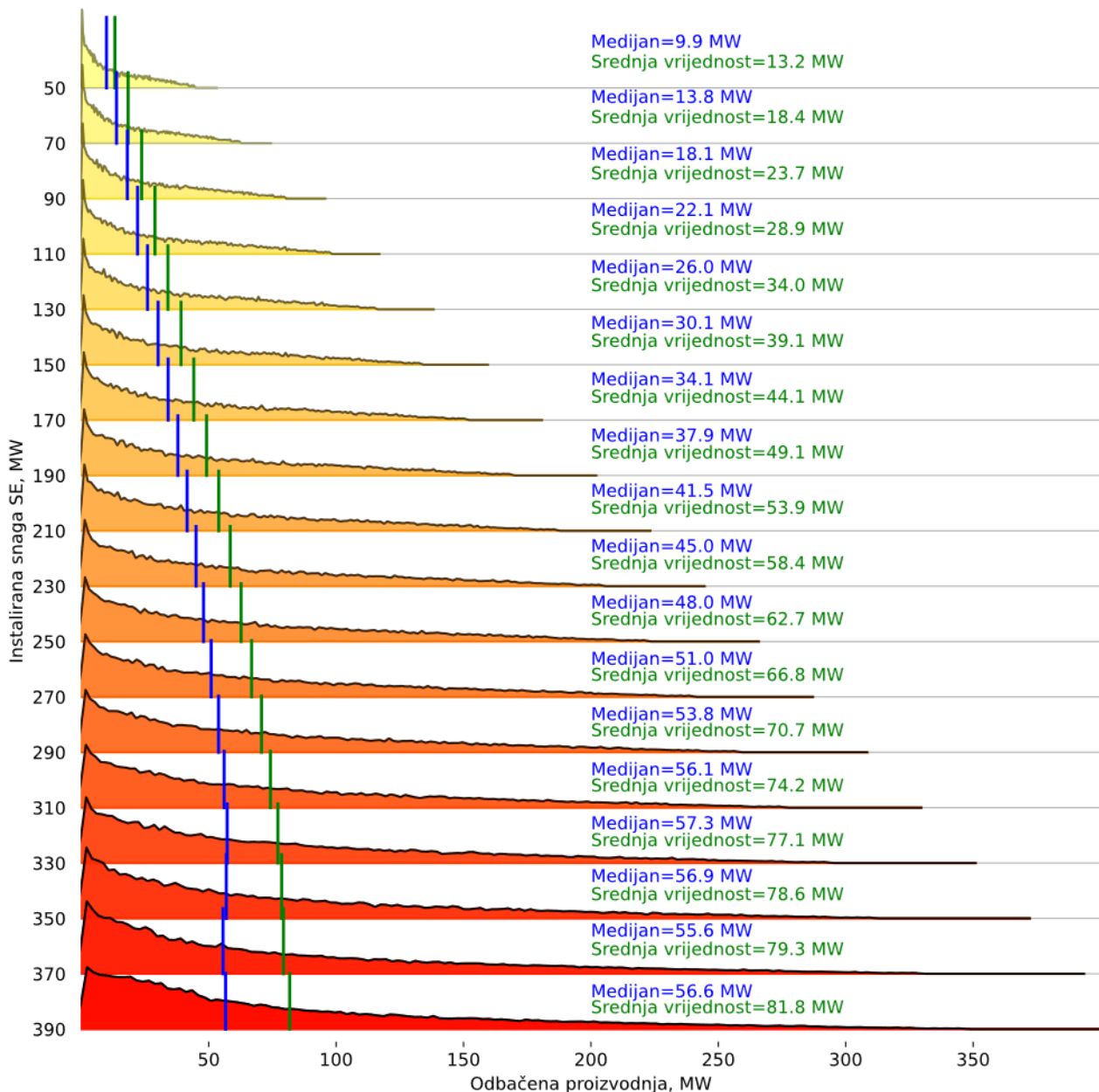
odbačene snage jednaka je razlici maksimalne snage VE + SE na pragu mreže i priključne snage. Pojava većih iznosa odbačene snage je malo vjerojatna.



Slika 4-15 Interpolacija odbačene proizvodnje s kvadratnom funkcijom



Slika 4-16 Distribucija odbačene proizvodnje za tri varijante instalirane snage SE



Slika 4-17 Distribucija odbačene proizvodnje za širi raspon instalirane snage s naznačenom srednjom vrijednošću i medijanom odbačene proizvodnje

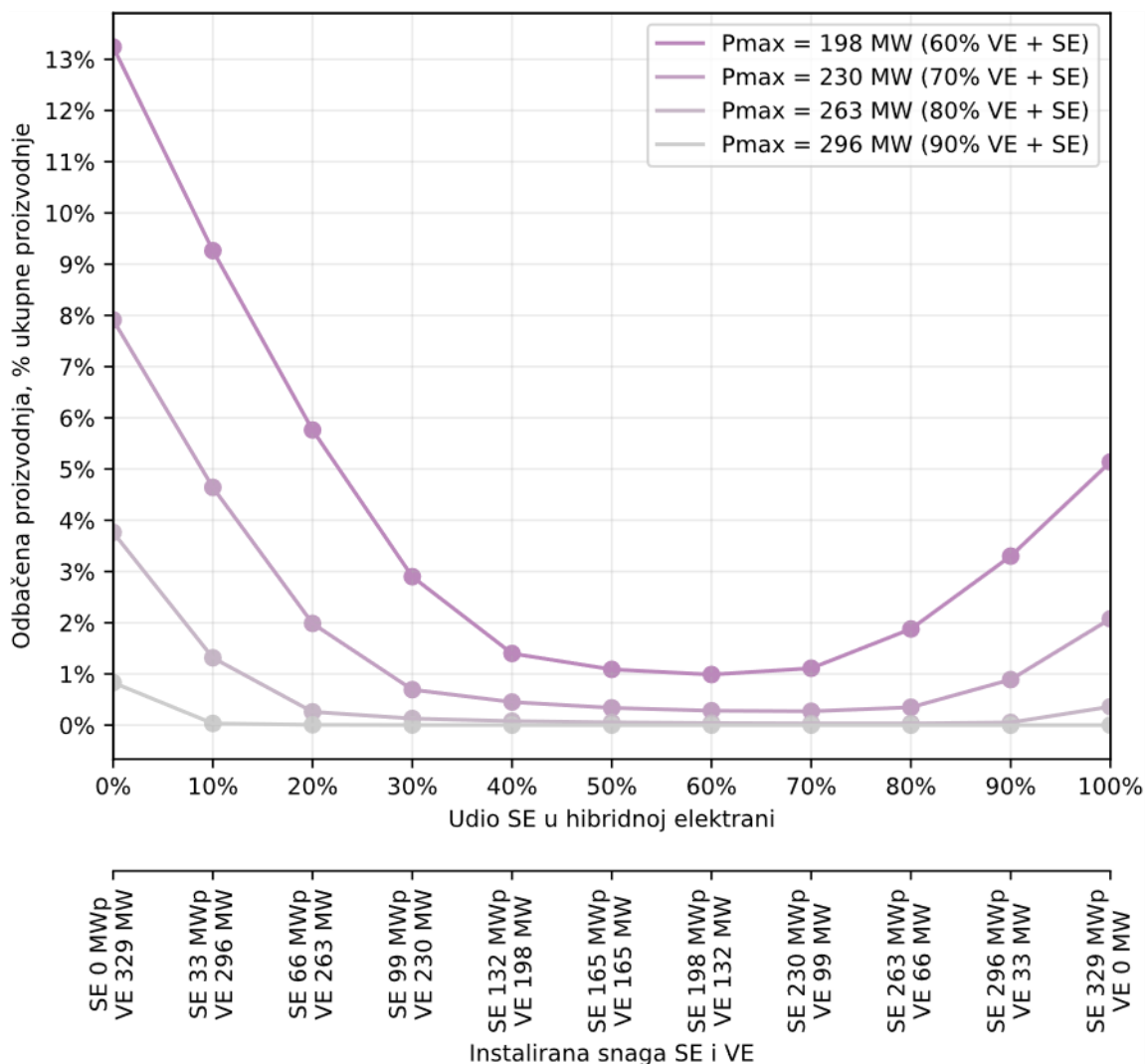
4.7 Ovisnost odbačene proizvodnje o udjelu snaga VE/SE i priključnoj snazi

Ako se odbačena proizvodnja prikaže u ovisnosti udjela SE u hibridnoj elektrani (u %) uz priključnu snagu kao parametar, dobiva se graf kao na slici 4-18. Pritom je pretpostavljeno da je hibridna elektrana instalirane snage 329,2 MW, te se s obzirom na nju skalira proizvodnja VE i SE s koracima od 10% instalirane snage da u zbroju iznose 329,2 MW. Iznos instalirane snage u ovom slučaju nema utjecaja na odbačenu proizvodnju s obzirom da se zanemaruje razmatranje efekta poravnanja.

Na temelju rezultata sa slike 4-18 moguće je zaključiti da se odbačena proizvodnja može značajno smanjiti pri ograničenoj priključnoj snazi ako je udio SE 40% – 70% u hibridnoj elektrani, dok se minimum javlja pri 60% udjelu SE (tj. 40% VE i 60% SE). Slično je dobiveno u [17] gdje su autori pokazali da se minimum odbačene proizvodnje dobiva pri 50% udjelu SE, ali naravno uz različite iznose odbačene proizvodnje budući da je riječ o drugačijoj lokaciji.

Na primjer, uz priključnu snagu 60% instalirane snage hibridne elektrane i udio 40% VE i 60% SE u hibridnoj elektrani odbačena proizvodnja iznosi svega 1%. U istoj varijanti, za VE (0% SE) odbačena proizvodnja iznosila bi oko 13,2% te 5,1% za SE (0% VE), što je značajno više. Navedeno ukazuje na glavnu prednost hibridnih elektrana koja je posljedica sinergije proizvodnje vjetroelektrana i sunčanih elektrana.

Sa donje slike također je moguće objasniti zašto se kod VE tipično instalirana snaga nešto uvećava u odnosu na priključnu snagu. U ovom slučaju, odbačena proizvodnja pri $P_{max} = 90\%$ VE iznosi cca 0,9%. Međutim, potrebno je napomenuti da su zanemareni gubici u energetskom transformatoru SN/VN, čijim bi uključanjem radna snaga na mjestu priključka bila nešto manja, a samim time i odbačena proizvodnja.



Slika 4-18 Ovisnost odbačene proizvodnje o udjelu instalirane snage SE u hibridnoj elektrani (0 – 100%) i omjeru priključne snage i instalirane snage hibridne elektrane (VE + SE) između 60% i 90%

5. MODELIRANJE VJETROELEKTRANA I SUNČANIH ELEKTRANA PRI VISOKIM VREMENSKIM REZOLUCIJAMA

U ovom poglavlju iznesen je pristup modeliranju VE i SE pri visokim vremenskim rezolucijama, s osobitim naglaskom na konkretnu primjenu predmetnih modela za potrebe analize odbačene proizvodnje u hibridnim elektranama. U kontekstu ove disertacije, pod visokom vremenskom rezolucijom smatraju se vremenske rezolucije <10 min kod kojih klasični modeli VE i SE ne mogu dati zadovoljavajuće rezultate, odnosno gdje potonji unose visoku pogrešku u izlaznoj vremenskoj seriji radne snage. Pogreška kod klasičnih modela je prvenstveno posljedica zanemarenja efekta poravnanja koji ima to veći učinak što je veća instalirana snaga VE i/ili SE. U odnosu na klasične modele VE i SE, predloženi modeli VE i SE uzimaju u obzir efekt poravnanja te daju realističnije vremenske serije izlazne radne snage.

Prije razvoja matematičkih modela VE i SE, ispitane su karakteristike efekta poravnanja u VE i SE u vremenskoj i frekvencijskoj domeni. Za predloženi model VE, analiza je provedena primjenom posebnog tipa diskretne wavelet transformacije (DWT, engl. *Discrete Wavelet Transform*), tj. metode maksimalnog preklapanja DWT (MODWT, engl. *Maximal Overlap Discrete Wavelet Transform*). Rezultati analize efekta poravnanja primjenom MODWT-a primijenjeni su za razvoj predloženog modela VE. Predloženi model VE je verificiran usporedbom s mjerenjima radne snage VA u operativnoj VE. Nasuprot tome, predloženi model SE zasnovan je većim dijelom na prethodno razvijenom modelu [48], a uz odgovarajuću doradu model je unaprijeđen i prilagođen za primjenu na SE instaliranih snaga >1 MWp. S obzirom da mjerenja proizvodnje operativne SE u visokoj vremenskoj rezoluciji nisu bila dostupna, za predloženi model SE nije napravljena verifikacija kao u slučaju kod VE (na stvarnim podacima proizvodnje). Nadalje, verifikacija modela SE nije bila ni potrebna s obzirom da je temelj modela zasnovan na prethodnom radu [48] koji je izveden iz mjerenih podataka na operativnim SE. Ispitivanja efekta poravnanja i fluktuacija proizvodnje provedena su u sklopu programskog paketa Python [100], kao i razvoj matematičkih modela VE i SE.

Dio iznesenih rezultata u sklopu ovog poglavlja koji se odnosi na analizu efekta poravnanja u VE zasnovan je na objavljenom radu [44], dok je dio rezultata vezan za predložene modele VE i SE objavljen u radu [101]. Korišteni podaci preuzeti s VE i SE, a koji podupiru istraživanje u sklopu doktorske disertacije, deponirani su u Zenodo repozitorij i dostupni su na zahtjev [102]–[107].

5.1 Analiza varijacija proizvodnje primjenom wavelet transformacije

Za analizu varijacija proizvodnje VE i SE koriste se različite metode u vremenskoj i frekvencijskom domeni. Tradicionalne metode uključuju primjenu standardne devijacije, varijance ili nekog druge izvedene metrike u vremenskoj domeni, dok se u frekvencijskom domeni većinski primjenjuje Fourierova transformacija [108].

Fourierova transformacija daje informaciju o frekvencijskom spektru signala, tj. frekvenciju i amplitudu pojedinih komponenti koje su sadržane u signalu. U standardnoj formi Fourierova transformacija funkcije f može se raspisati kao:

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (5.1)$$

gdje je t kontinuirana varijabla, a ω kružna frekvencija. Glavni nedostatak Fourierove transformacije leži u činjenici da ista daje samo informaciju o frekvencijskom spektru signala, bez mogućnosti lokalizacije

pojedinih frekvencija. Drugim riječima, primjenom Fourierove transformacije nije moguće zaključiti kada se koja frekvencija signala pojavila na vremenskoj skali.

5.1.1 Uvod u Wavelet transformaciju

Wavelet transformacija je alat pomoću kojeg je moguće raščlaniti funkciju ili podatke u različite frekvencijske komponente, a zatim pojedinačno analizirati svaku od komponenata s razlučivosti koja odgovara njezinoj skali [109]. Razvijen je kao svojevrsna alternativa Fourierovoj transformaciji, a otkriva informaciju o frekvencijskom spektru signala kao i Fourierova transformacija, ali istovremeno identificira gdje se pojedina frekvencija pojavila na vremenskoj skali, što omogućava ispitivanje signala istovremeno u frekvencijskom i vremenskom području. Tipičan primjer primjene Wavelet transformacije je u identifikaciji frekvencijskog spektra neke funkcije u odgovarajućem intervalu.

Wavelet transformacija zasniva se na raščlanjivanju signala (vremenske serije) na skup baznih funkcija nazvanih waveleti. Wavelet je valoviti signal lokaliziran u vremenu (tj. vremenski ograničen), a koji sadrži dva osnovna svojstva: skalu (obrnuto proporcionalno frekvenciji) i lokaciju (pomak signala). Skala definira koliko je wavelet razvučen odnosno frekvencijski raspon signala, dok lokacija definira gdje je wavelet pozicioniran na vremenskoj skali.

5.1.1.1 Kontinuirana Wavelet transformacija

Kontinuirana Wavelet transformacija je definirana sljedećom jednadžbom:

$$CWT(s, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{s,\tau}^*(t) dt \quad (5.2)$$

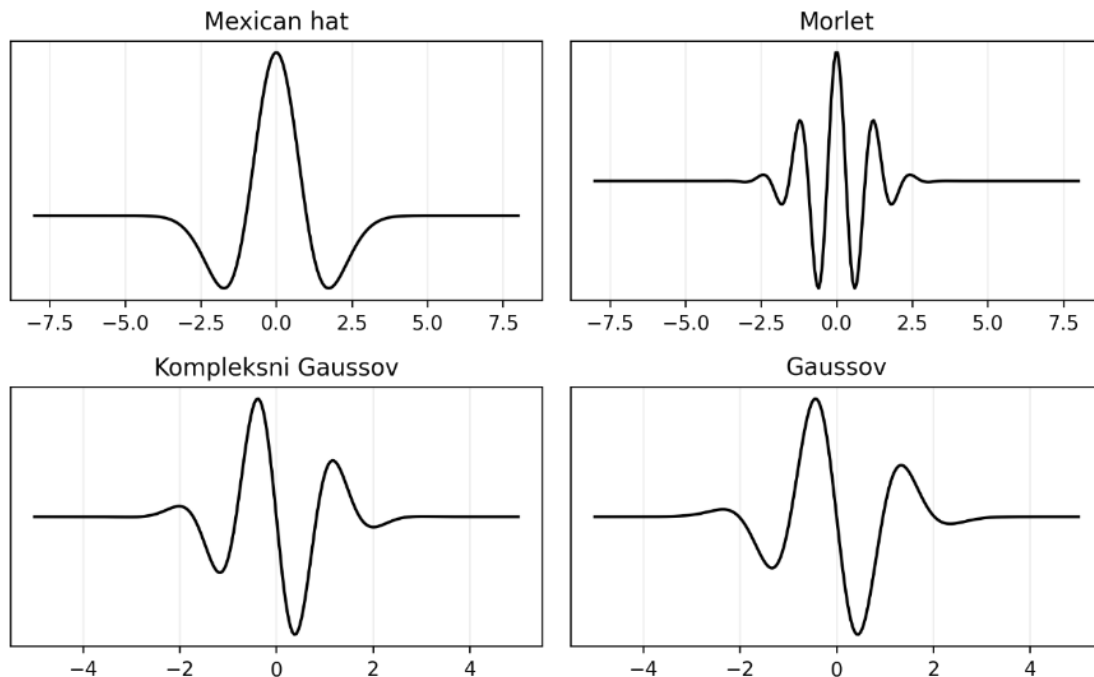
gdje su:

- $f(t)$ ulazna funkcija vremena t ,
- s skala, $s > 0$,
- τ vremenski pomak,
- $*$ operator kompleksne konjugacije,
- $\psi_{s,\tau}(t)$ wavelet funkcija.

Wavelet funkcija opisana je izrazom:

$$\psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t - \tau}{s}\right) \quad (5.3)$$

gdje je ψ osnovna ili temeljna funkcija (engl. *mother wavelet*) iz koje su izvedene sve wavelet funkcije. Za temeljnu funkciju se mogu odabrati razne funkcije, npr. poput Gaussovog, Meyerovog, Morletovog ili tzv. sombrero (engl. *Mexican hat*) waveleta. Primjer nekih od waveleta prikazani su na slici 5-1. Promjenom parametra τ , wavelet će se pomicati duž osi bez promjene oblika, dok će promjena parametra s uzrokovati promjenu oblika wavelet-a odnosno wavelet će pokrivati različiti frekvencijski spektar.



Slika 5-1 Primjer kontinuiranih temeljnih wavelet funkcija

Potrebno je napomenuti da se za wavelet može odabrati proizvoljna funkcija koja mora zadovoljavati sljedeća dva svojstva [110]:

- (1) Srednja vrijednost funkcije ψ jednaka je nula:

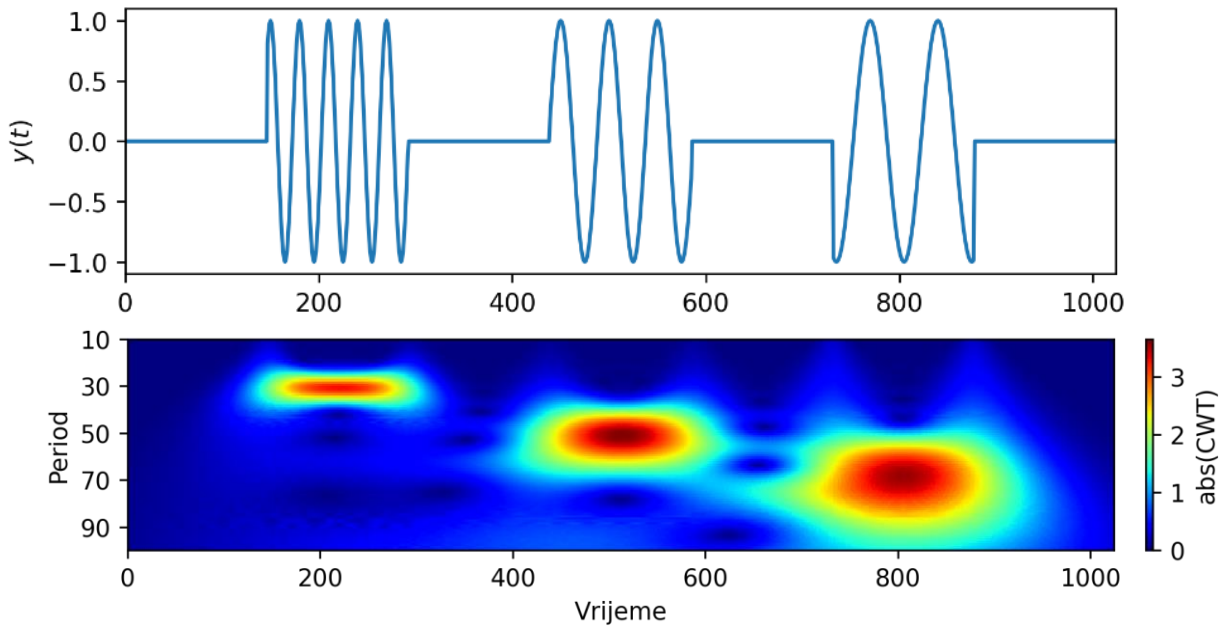
$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (5.4)$$

- (2) Integral kvadrata funkcije ψ mora biti jednak jedinici:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi^2(t) dt = 1 \quad (5.5)$$

Iz jednadžbe (5.2), kontinuirana wavelet transformacija računa konvoluciju ulaznog signala/funkcije $f(t)$ sa nizom funkcija dobivenih iz temeljnog waveleta, koji se još nazivaju izvedeni waveleti (engl. *child wavelet*) ili jednostavno wavelet funkcije. Vrijednost funkcije $CWT(s, \tau)$ za odabranu vrijednost parametara τ i s je to veća što je veće podudaranje izvedenog waveleta i ulazne funkcije. Ako se za svaku skalu s wavelet translacija duž vremenske osi, dobiva se niz koeficijenata čija vrijednost ukazuje na prisustvo pojedinih frekvencija u danom trenutku. Rezultat takvog procesa je tzv. skalogram, koji je za ulaznu funkciju $y(t)$ prikazan na slici 5-2. Kao primjer ulazna funkcija predstavlja tri sinusne funkcije jednake amplitude i različitih perioda koji iznose 30 s, 50 s i 70 s, pomnožene prozorskom funkcijom koja ih definira na odgovarajućim intervalima.

Na skalogramu je moguće uočiti koji periodi/frekvencije su se ostvarile u originalnom signalu $y(t)$ na vremenskoj osi, što očito nije moguće primjenom Fourierove transformacije koja samo daje informaciju o prisutnim frekvencijama.



Slika 5-2 Skalogram (rezultat kontinuirane wavelet transformacije) ulazne funkcije $y(t)$

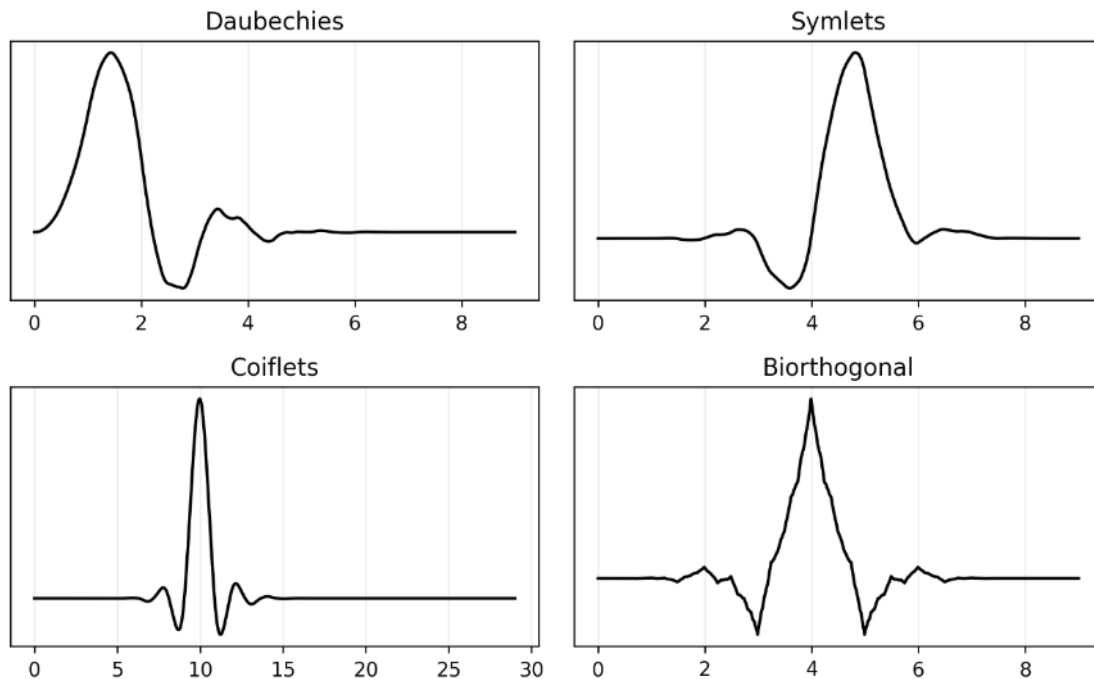
5.1.1.2 Diskretna wavelet transformacija

Kontinuirana wavelet transformacija je korisna za teorijsku analizu, tj. riječ je o formalnom alatu koji nije moguće primijeniti u numeričkom smislu budući da je potrebna diskretizacija ulaznog signala i parametara waveleta kako bi se omogućila primjena na računalu. Dakle, kod kontinuirane wavelet transformacije parametri τ i s se mijenjaju kontinuirano [109].

U praktičnoj primjeni koristi se diskretna wavelet transformacija, kod koje su waveleti dobiveni diskretnim odabirom parametara s i τ . Diskretna wavelet transformacija se može formalno raspisati kao:

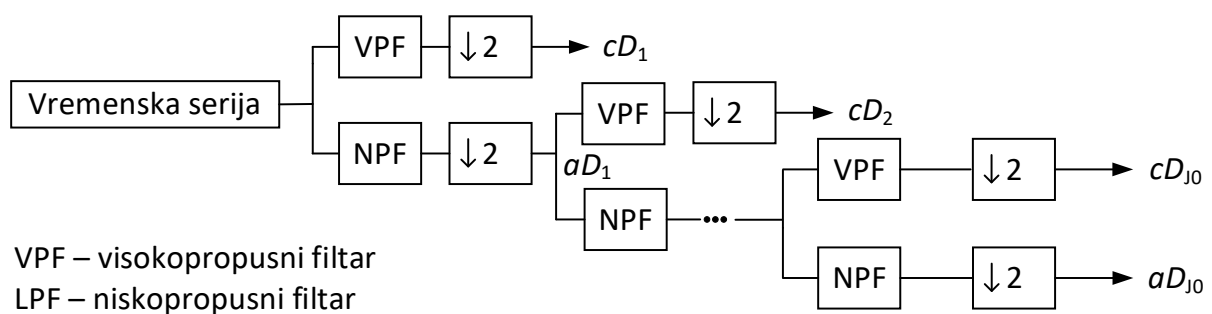
$$DWT[a, b] = \frac{1}{\sqrt{b}} \sum_{j=0}^{N-1} f[t_j] \cdot \psi \left[\frac{t_j - a}{b} \right] \quad (5.6)$$

gdje su a i b diskretne verzije parametara τ i s , respektivno, pri čemu se obično odabiru dijadne skale, odnosno $b = 2^{j-1}$, $j=1, 2, 3, \dots$, itd., a zatim se za parametar a odabire $a = k2^j$. Neke od učestalih diskretnih temeljnih wavelet funkcija prikazane su na slici 5-3. Zapravo, riječ je o familijama diskretnih wavelet funkcija, a unutar svake familije postoji značajan broj varijanti odnosno redova funkcija.



Slika 5-3 Primjer diskretnih temeljnih wavelet funkcija

Efikasan proračun koeficijenata DWT-a omogućen je pomoću Mallatovog algoritma [111]. Proračun koeficijenata DWT-a se sastoji od niza visokopropusnih i niskopropusnih filtara čije su prijenosne funkcije dobivene iz temeljnog waveleta [112]. Signal ili ulazna vremenska serija se u prvom stupnju provlači kroz visokopropusni filter i niskopropusni filter, nakon čega se izlazni signal iz filtra poduzorkuje. Izlaz iz visokopropusnog filtra prvog stupnja nakon poduzorkovanja sa dva (zadržavaju se samo parni indeksi signala) daje detaljne koeficijente prvog stupnja cd_1 , dok izlaz iz niskopropusnog filtra daje aproksimacijske koeficijente prvog stupnja ad_1 . U sljedećem koraku, aproksimacijski koeficijenti se provlače kroz sljedeći stupanj na isti način, a postupak se nastavlja sve do konačnog stupnja J_0 . Algoritam je grafički prikazan na slici 5-4.



Slika 5-4 Algoritam za proračun koeficijenata DWT-a

Jedno od osnovnih svojstava koeficijenata odnosno DWT-a je da se dekompozicijom na koeficijente očuvava varijanca vremenske serije. Navedeno svojstvo omogućava analizu varijacije ulaznog signala.

5.1.2 Metoda maksimalnog preklapanja diskretne wavelet transformacije

Metoda maksimalnog preklapanja diskretne wavelet transformacije (MODWT) je poseban tip diskretne wavelet transformacije u kojem se ponavljaju svi koraci provedeni u DWT-u, ali bez poduzorkovanja. Ukidanje poduzorkovanja omogućava dvije prednosti u odnosu na klasičnu DWT [110]:

- MODWT ne zahtjeva rad s vremenskim serijama duljine 2^n , gdje je n prirodni broj,
- svaka vremenska serija tj. koeficijenti koji proizlaze iz MODWT-a imaju istu duljinu kao i originalna vremenska serija.

Formalna definicija MODWT-a je dana u [113]. U nastavku je dan kratki teorijski uvod u MODWT. Ako se MODWT primjeni na vremenskoj seriji $y=[y_1, y_2, \dots, y_T]$, gdje je T duljina vremenske serije, kao rezultat dobiva se J_0+1 novih vremenskih serija, svaka jednake duljine T . Važno svojstvo MODWT-a, koje dijeli sa DWT-om, je da se dekompozicijom vremenske serije y može očuvati varijanca vremenske serije. Drugim riječima, varijanca vremenske serije y se može raspisati kao suma varijanci raščlanjenih vremenskih serija dobivenih kao rezultat primjene MODWT-a [110]:

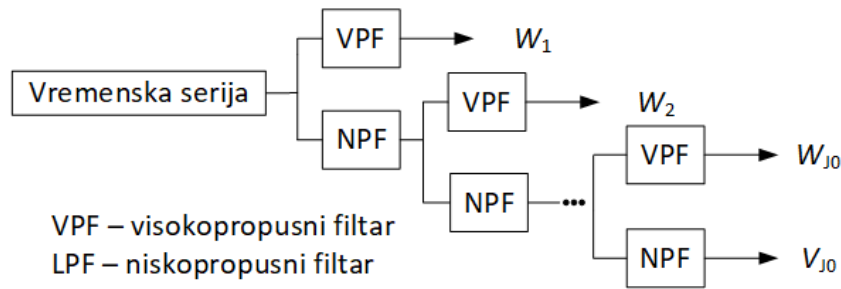
$$\|y\|^2 = \|V_{J_0}\|^2 + \sum_{j=1}^{J_0} \|W_j\|^2 \quad (5.7)$$

gdje je $\|\cdot\|$ norma vektora, W_j su tzv. wavelet koeficijenti (engl. *wavelet coefficients*), a V_{J_0} tzv. koeficijenti skaliranja posljednjeg stupnja (engl. *final-level scaling coefficients*). Wavelet koeficijenti i koeficijenti skaliranja imaju slična svojstva kao detaljniji koeficijenti i aproksimacijski koeficijenti DWT-a.

Primjena MODWT-a na proizvoljnoj vremenskoj seriji prikazana je na slici 5-5. U prvom stupnju, ulazna vremenska serija se provlači kroz visokopropusni i niskopropusni filter čija su svojstva pobliže objašnjena u [110]. Izlaz iz visokopropusnog filtera prvog stupnja (skala 1) daje fluktuacije najviše frekvencije sadržane u ulaznoj vremenskoj seriji, a iste su reprezentirane pomoću wavelet koeficijenata prvog stupnja $W_1 = [W_{11}, W_{12}, \dots, W_{1T}]$. Izlaz iz niskopropusnog filtera prvog stupnja (V_1) se dalje provlači kroz visokopropusni i niskopropusni filter drugog reda, pri čemu se ponavlja prethodni postupak razdvajanja na visoke i niske frekvencije do odgovarajućeg reda J_0 . MODWT generira J_0+1 vremenskih serija, pri čemu se J_0 može proizvoljno odabrati do razine s kojom je nejednadžba $2^{J_0} \leq T$ zadovoljena, odnosno broj stupnjeva MODWT-a ovisi o duljini vremenske serije. Dakle, postupak je ekvivalentan kao i kod DWT-a, ali bez poduzorkovanja.

Na primjer, za vremensku seriju brzine vjetra mjerenu u 1 min rezoluciji tijekom jedne godine, ukupno je $T=525600$ podataka. Maksimalan broj stupnjeva MODWT-a iznosi $J_0=19$, budući da je za $2^{19}=524288$ prethodna nejednadžba još uvijek zadovoljena. Broj stupnjeva MODWT-a može biti i manji od maksimalnog. U tom slučaju, dekompozicija će se provesti do odabranog stupnja J_0 , a preostali dio fluktuacija će se pridijeliti koeficijentu skaliranja posljednjeg stupnja V_{J_0} .

Važno je navesti da wavelet koeficijenti predstavljaju fluktuacije sadržane u vremenskoj seriji odgovarajućeg frekvencijskog raspona. Ako je period uzorkovanja 1 sekunda, najbrža komponenta frekvencije koja se može uočiti iznosi 0,5 Hz (period fluktuacija 2 sekunde) prema Nyquistovom teoremu [53]. Wavelet koeficijent prvog stupnja će tada predstavljati fluktuacije s periodom između 2 – 4 s, u drugom stupnju 4 – 8 s, itd. Općenito vrijedi da će wavelet koeficijent j -tog stupnja sadržavati fluktuacije s periodom $2^j - 2^{j+1}$.



Slika 5-5 Primjena metode maksimalnog preklapanja diskretne wavelet transformacije (MODWT) na proizvoljnoj vremenskoj seriji

Kod primjene DWT-a i MODWT-a važno je voditi računa i o rubnim uvjetima. Filteri koji se koriste u pojedinim stupnjevima transformacije koriste tzv. kružno filtriranje (engl. *circular filtering*), koje pri doticaju s krajevima i počecima ulazne vremenske serije tretiraju istu kao periodičnu s odgovarajućim periodom. Izvan zabilježenih vrijednosti, tj. intervala između početka i kraja vremenske serije, koriste se surogati s kojima se dodaju nezabilježene vrijednosti. Koeficijenti koji koriste surogate se nazivaju i rubni koeficijenti. Zbog prisustva rubnih koeficijenata, varijanca pojedinih koeficijenata se ne može točno odrediti, već samo procijeniti u odgovarajućim granicama pouzdanosti. Granice pouzdanosti za varijancu izvedene su u [110].

Na sličan način MODWT se može koristiti za dekompoziciju kovarijance i korelacije kako bi se procijenila povezanost između dviju vremenskih serija po različitim vremenskim skalama. Kovarijanca i korelacija izračunata pomoću MODWT-a je također podložna rubnim uvjetima. Detaljniji tretman granica pouzdanosti za kovarijancu i korelaciju dan je u [113].

5.1.3 Multirezolucijska analiza

Primjenom MODWT-a ili DWT-a na ulaznom signalu dobivaju se vremenske skale, odnosno wavelet koeficijenti i koeficijenti skaliranja, za koje je svojstveno da zadržavaju varijancu originalne vremenske serije. To svojstvo čini ih prikladnima za analizu varijance ili korelacijsku analizu različitih vremenskih serija.

Međutim, wavelet koeficijenti i koeficijenti skaliranja nisu vremenski preklapljeni s originalnom vremenskom serijom i ne mogu se direktno koristiti za rekonstrukciju signala. Iz tog razloga uvedena je multirezolucijska analiza (MRA, engl. *Multiresolution Analysis*) zasnovana na DWT-u ili MODWT-u.

Multirezolucijska analiza u teoriji wavelet-a podrazumijeva raščlanjivanje ulazne vremenske serije na različite vremenske skale koje imaju aditivno svojstvo i omogućavaju savršenu rekonstrukciju vremenske serije. U osnovi, MRA se tipično koristi za aproksimaciju ulazne vremenske serije korištenjem vremenskih skala viših i nižih frekvencija.

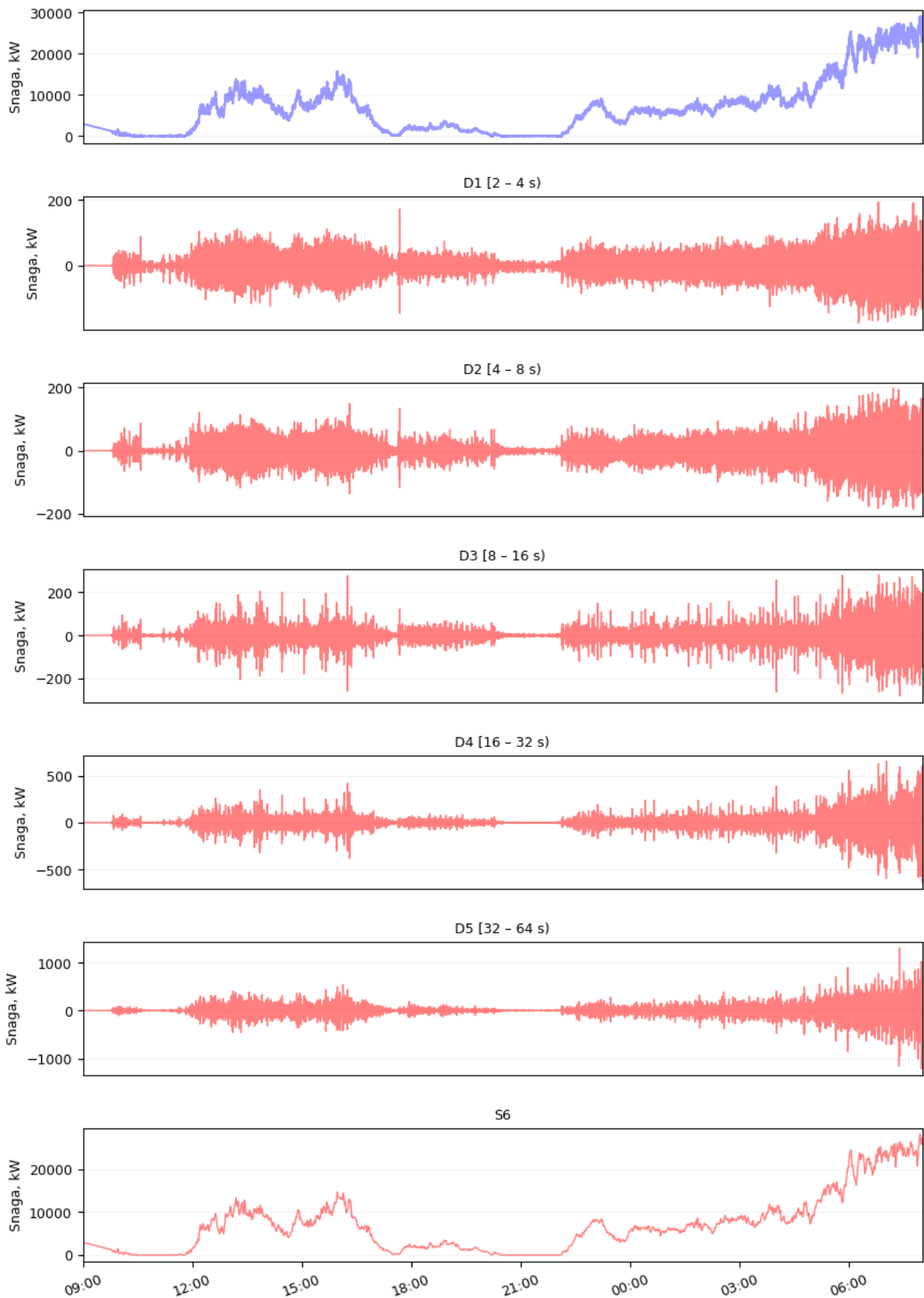
Dekompozicija MODWT MRA može se raspisati kao [110]:

$$y = S_{J_0} + \sum_{j=1}^{J_0} D_j \quad (5.8)$$

gdje su D_j tzv. detaljni koeficijenti (engl. *detail coefficients*), a S_{J_0} koeficijenti prigušenja posljednjeg stupnja J_0 (engl. *final level smoothing coefficients*).

Na slici 5-6 u nastavku demonstrirana je primjena MRA na vremenskoj seriji izlazne radne snage vjetroagregata (prikazano plavom bojom) mjerene u 1 sekundnoj rezoluciji. Dekompozicija je napravljena na pet detaljnijih koeficijenata D1 – D5, dok su preostali koeficijenti sadržani u preostalom stupnju S6 koji podrazumijeva originalnu vremensku seriju radne snage vjetroagregata umanjenu za koeficijente D1 do D5. Budući da su u koeficijentima D1 do D5 sadržane najbrže fluktuacije, S6 u ovom slučaju predstavlja filtriranu vremensku seriju proizvodnje VA. Broj stupnjeva J_0 na koji se raščlanjuje vremenska serija je proizvoljan, a odabire se s obzirom na nivo fluktuacija koji se želi razmatrati u vremenskoj seriji.

Za programsku implementaciju MODWT i MRA korišten je alat WMTSA (engl. *Wavelet Methods for Time Series Analysis*) u Pythonu [114] koji je izrađen kao translacija ekvivalentnog alata [115] u programskom paketu Matlab [116]. Oba alata su zasnovana na teorijskog podlozi MODWT-a prema razradi u istoimenoj knjizi autora Percival i Walden [110].



Slika 5-6 MRA vremenske serije radne snage vjetroagregata na prvih pet detaljnih koeficijenata (D1 – D5)

5.2 Prigušenje fluktuacija snage vjetroagregata i efekt poravnanja u vjetroelektranama

Fluktuacije snage u vjetroelektranama posljedica su fluktuacija vjetra koje su stohastičke naravi. Kada se na lokaciji vjetroelektrane promatraju fluktuacije brzine vjetra i fluktuacije u proizvodnji vjetroelektrane korištenjem podataka visoke razlučivosti, moguće je primijetiti da su brze fluktuacije značajno manje prisutne u proizvodnji. Kažemo da su fluktuacije snage vjetroelektrane prigušene. Prigušenje fluktuacija u vjetroelektrani posljedica je dvaju faktora:

- prigušenja fluktuacija na razini svakog vjetroagregata i
- prigušenja u zbirnoj proizvodnji vjetroagregata.

Prigušenje na razini VA posljedica je primarno inercije VA na promjenu brzine vjetra, što se očituje smanjenim iznosom fluktuacija u području viših frekvencija. Zbirna proizvodnja VA, odnosno proizvodnja vjetroelektrane dodatno je prigušena zbog nejednakosti proizvodnih profila VA unutar VE, a ovisi o karakteristikama terena, udaljenosti VA, klimatskim uvjetima i smjeru vjetra. Prigušenje zbirne proizvodnje VA u odnosu na proizvodnju jednog VA naziva se efekt poravnanja (engl. *smoothing effect*). U nastavku su analizirane dinamičke karakteristike vjetroagregata i efekt poravnanja u VE primjenom podataka brzine vjetra i radne snage prikupljene sa tri operative VE. Rezultati analize korišteni su za model VE u potpoglavlju 5.4.

5.2.1 Ulazni podaci

Za ispitivanje prigušenja fluktuacija VA i efekta poravnanja zbirne proizvodnje VA u ovom poglavlju korištena je metoda maksimalnog preklapanja DWT-a. Ispitivanje je provedeno na tri operative VE „A“, „B“ i „C“. Osnovni tehnički podaci pojedinih VE prikazani su u tablici 5-1. [102]

Tablica 5-1 Osnovni podaci razmatranih VE

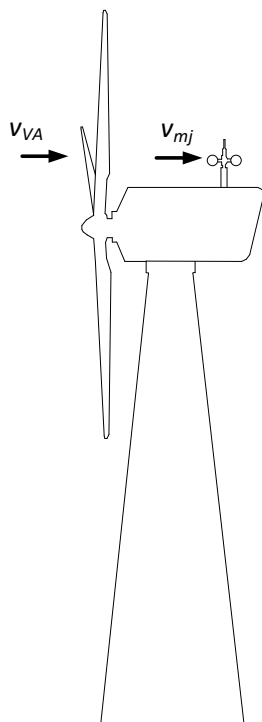
Vjetroelektrana	„A“	„B“	„C“
Broj VA	7/9	57	38
Nazivna snaga VA	2,85/3,2 MW	2,75 MW	2,75 MW
Tip terena	Kompleksan	Ravan	Ravan

Za svaku VE, dostupni su 1 s podaci izlazne radne snage svih VA i mjerenja brzine vjetra na anemometru smještenom na gondoli VA. Period mjerenja iznosi 30 dana za VE „A“ i „C“, te 11 dana za VE „B“. Proizvođači VA obično daju dvije brzine vjetra:

- direktna mjerenja brzine vjetra na anemometru (v_{mj}) i
- mjerenja brzine vjetra na anemometru korigirana s odgovarajućom prijenosnom funkcijom ($v_{mj,k}$).

S obzirom na smještaj anemometra na gondoli VA i na činjenicu da vjetar dolazi iz smjera lopatica, brzina vjetra mjerena na anemometru ne prikazuje stvarnu brzinu vjetra relevantnu za primjenu P-v karakteristike VA (tj. ulaznu brzinu vjetra v_{VA}) i stoga se direktno ne smije koristiti. Naime, budući da vjetar koji dolazi iz smjera lopatica na anemometar predaje dio svoje kinetičke energije lopaticama, brzina vjetra

iza lopatica je manja u odnosu na ulaznu brzinu vjetra prije konverzije u kinetičku energiju lopatica (slika 5-7). Dakle, brzina vjetra mjerena na anemometru je manja u odnosu na ulaznu brzinu vjetra.



Slika 5-7 Ulazna brzina vjetra v_{VA} i mjerena brzina vjetra na anemometru v_{mj}

Kako bi se mjerenja sa anemometra ispravno koristila, korekcija mjerenja se vrši primjenom prijenosne funkcije gondole (NTF, engl. *nacelle transfer function*) sukladno standardu IEC 61400-12-2 [117]. Prijenosna funkcija između brzine vjetra mjerene na anemometru i ulazne brzine vjetra se obično izražava polinomom višeg reda. U [60], za prijenosnu funkciju predložen je polinom petog reda koji se interpolira kroz mjerene podatke:

$$v_{mj} = a_1 v_{mj,k}^5 + a_2 v_{mj,k}^4 + a_3 v_{mj,k}^3 + a_4 v_{mj,k}^2 + a_5 v_{mj,k} + a_6 \quad (5.9)$$

gdje su:

- v_{mj} brzina vjetra mjerena na anemometru na gondoli,
- $v_{mj,k}$ korigirana brzina vjetra,
- a_i koeficijenti polinoma koji se određuju interpolacijom.

Ovakvom korekcijom nastoji se dobiti vrijednost koja približno odgovara ulaznoj brzini vjetra, tj. $v_{VA} \approx v_{mj,k}$.

Podaci brzine vjetra korišteni u nastavku dobiveni su korekcijom mjerene brzine vjetra na anemometru pomoću prijenosne funkcije postavljene od strane proizvođača VA.

5.2.2 Dinamičke karakteristike vjetroatagregata

Prigušenje brzih fluktuacija vjetra javlja se zbog inercije rotirajuće mase lopatica koje apsorbiraju udare vjetra i inercije sustava turbine i generatora [51]. Ispitivanja utjecaja inercijskog sustava VA na dinamiku proizvodnje ispitana su u [52]. Odziv VA kvantificiran je primjenom prirodne vremenske konstante VA koja odgovara vremenu potrebnom da se generator VA iz stanja mirovanja zavrti na nazivnu brzinu. Autori su

pokazali da će kod značajnijih fluktuacija brzine vjetra proizvodnja VA značajnije odstupati u odnosu na P-v karakteristiku.

Farmer i Rix [53] su proveli analizu prigušenja VA tipa Siemens SWT 2.3-108. Dinamika prigušenja je ispitana usporedbom brzine vjetra i proizvodnje VA. Autori su pokazali da se dinamika može opisati niskopropusnim filtrom prvog reda brzine vjetra, te došli do zaključka da se za predmetni VA može očekivati pad pojačanja filtra za 3 dB pri periodu fluktuacija od cca 6,9 min. U [118] također je potvrđeno, primjenom wavelet transformacije, da se VA može modelirati kao niskopropusni filter prvog reda za brzinu vjetra.

Stvarna proizvodnja VA će odstupati od teorijske krivulje snage definirane od proizvođača VA zbog raznih utjecaja poput promjene smjera vjetra i reakcije upravljačkog sustava na tu promjenu, inercije VA, turbulencije i operativnih specifičnosti poput zaleđivanja lopatica [50, str. 419], nečistoća, oštećenja itd. Neke od prethodno spomenutih utjecaja poput inercije VA i reakcije upravljačkog sustava VA je moguće uočiti samo kod primjene viših vremenskih rezolucija, tj. kraćih vremenskih intervala.

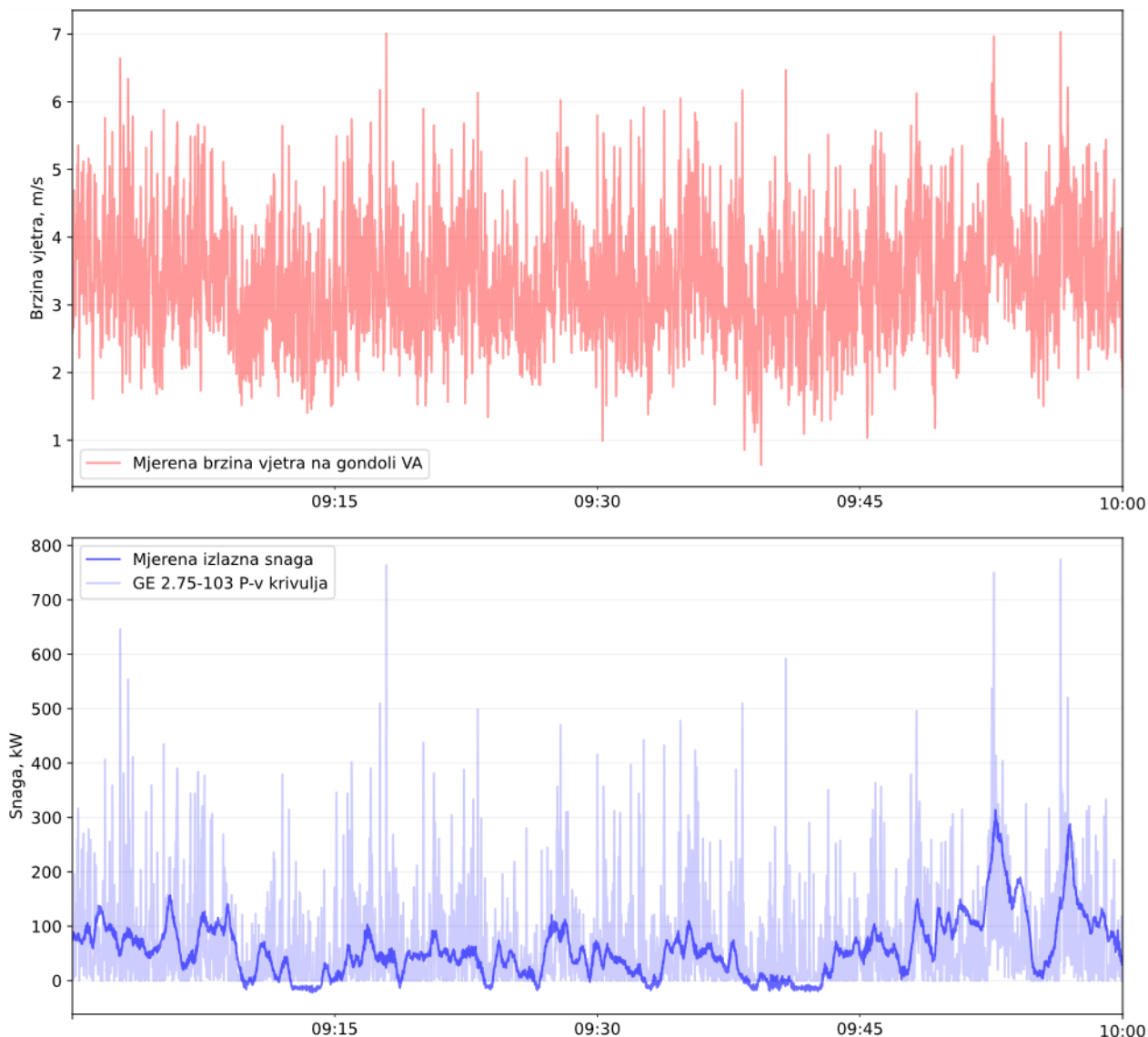
Proračun proizvodnje VE u literaturi je najčešće zasnovan na primjeni krivulje snage VA. Statičku krivulju snage je opravdano koristiti kod pretvorbe brzine vjetra u proizvodnju kod podatka niže razlučivosti, odnosno duljih vremenskih intervala poput 1 satnih prosjeka. Međutim, kod primjene viših vremenskih rezolucija, P-v karakteristika može rezultirati nerealističnim fluktuacijama, budući da ne uzima u obzir stvarni odziv VA na promjene brzine i smjera vjetra. Prigušenje fluktuacija snage VA i pogrešku koja se unosi kod primjene P-v karakteristike VA nije jednostavno kvantificirati s obzirom da ulazna brzina vjetra prije pretvorbe u proizvodnju nije dostupna. U tu svrhu, može se koristiti brzina vjetra mjerena na anemometru smještenom na mjernom stupu ili, kao u nastavku, na gondoli VA (korigirana s prijenosnom funkcijom).

Pogreška se ispituje na način da se mjerena radna snaga VA uspoređi sa P-v karakteristikom dobivenom na temelju korigirane brzine vjetra na anemometru. P-v karakteristika je preuzeta od proizvođača General Electric (GE) za vjetroagregat tipa 2.75-103.

Ilustracija prigušenja fluktuacija kod VA je prikazana na slici 5-8, na kojoj su prikazane varijacije brzine vjetra te proizvodnja VA dobivena pretvorbom brzine vjetra u proizvodnju pomoću P-v karakteristike i mjerena izlazna snaga VA. Primjećuje se značajno manja razina fluktuacija kod mjerene izlazne snage VA u odnosu na snagu dobivenu preko P-v karakteristike, odnosno nepreciznost P-v karakteristike za opisivanje fluktuacije proizvodnje VA kod primjene 1 s rezolucije. Pod nepreciznosti u ovom smislu podrazumijeva se nemogućnost korištenja P-v karakteristike za dobivanje realističkih fluktuacija. Kod direktne primjene P-v karakteristike prisutni su skokovi u proizvodnji koji se u stvarnosti nisu dogodili, budući da su potencijalni udari vjetra ili kratkotrajne promjene brzine vjetra prigušene. Također, osim brzine vjetra mijenja se i smjer vjetra što onemogućava trenutno prilagođavanje VA u optimalnom smjeru, odnosno smanjena proizvodnja posljedica je i reakcije upravljačkog sustava VA na promjenu smjera vjetra.

Potrebno je napomenuti da mjerenja na anemometru na gondoli VA nemaju visoku preciznost. Anemometar na gondoli je primarno dimenzioniran da bude robustan i pouzdan. Mjerna nesigurnost u mjerenju brzine vjetra dodatno je uvećana u radnoj snazi s obzirom da radna snaga ovisi o trećoj potenciji brzine vjetra. Pogreška se unosi i samom prijenosnom funkcijom koja može uvećati/smanjiti stvarnu brzinu vjetra. Dodatnu nesigurnost unosi i gustoća zraka, čija promjena može imati značajan utjecaj na mjerne

rezultate. Zbog prethodno navedenih razloga, modeliranje proizvodnje VA na temelju mjerene brzine vjetra podloženo je većim pogreškama, osobito na kompleksnim terenima, te isto nije preporučljivo.

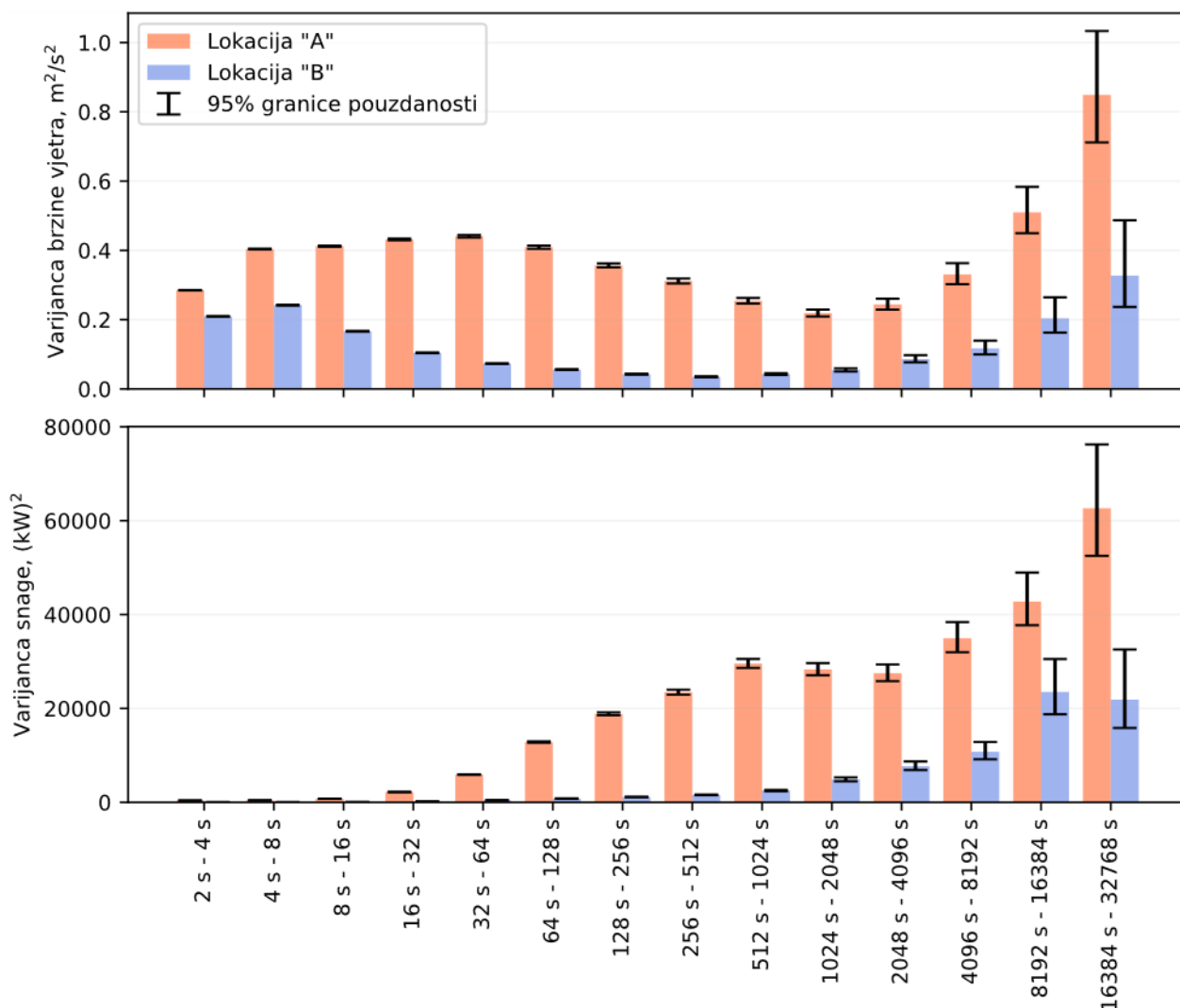


Slika 5-8 Fluktuacije brzine vjetra i proizvodnje vjetroturbine mjerene u 1 sekundnoj rezoluciji

Usporedba brzine vjetra i proizvodnje VA napravljena je i primjenom Wavelet transformacije. Za analizu vremenskih serija korištena je MODWT u kojoj su brzina vjetra i proizvodnja VA raščlanjene na 14 vremenskih skala korištenjem Daubechies najmanje asimetričnih ortogonalnih waveleta stupnja 8 („db8“ diskretni wavelet). Kao rezultat primjene MODWT-a na vremenskim serijama brzine vjetra i proizvodnje VA, dobivaju se koeficijenti wavelet koeficijenti W_j , $j=1, \dots, 14$, i koeficijenti skaliranja posljednjeg stupnja, tj. V_{15} . Za svaki koeficijent izračunata je varijanca korištenjem postupka prema [119]. Vremenske skale su podijeljene u grupe koje su ograničene potencijama broja dva, tj. n -ta vremenska skala je definirana granicama $2^n - 2^{n+1}$ sekundi, $n = 1, \dots, 14$. Uz varijance svake vremenske skale izračunate su i 95% granice pouzdanosti prema [110].

Tako izračunata varijanca pojedinih vremenskih skala brzine vjetra (prvi red) i izlazne radne snage VA (drugi red) prikazana je na slici 5-9 na lokacijama „A“ i „B“. Na slici se primjećuje da je varijanca brzine vjetra značajno izraženija pri kraćim periodima nego što je to kod izlazne radne snage VA. Štoviše, varijanca izlazne radne snage VA za periode fluktuacija manje od 64 s (cca 1 min) je relativno mala, neovisno o iznosu

fluktuacija brzine vjetra. Takav rezultat je očekivan zbog prigušenja fluktuacija brzine vjetra koje se događaju u vjetroagregatu. Dakle, nagle promjene vjetra s periodom kraćim od jedne minute nemaju značajan utjecaj na promjenu varijance izlazne radne snage VA. Fluktuacije snage s periodom iznad 1 min su manje prigušene pa će fluktuacije brzine vjetra s periodom >1 min imati značajniji utjecaj na promjene izlazne snage VA.



Slika 5-9 Varijanca brzine vjetra i izlazne snage VA različitih vremenskih skala na lokacijama „A“ i „B“

5.2.3 Analiza efekta poravnanja primjenom MODWT-a

Efekt poravnanja u VE u literaturi je iscrpno istražen u posljednjih nekoliko desetljeća. Analiza efekta poravnanja je provedena primjenom Fourierove transformacije [42], [43], [120]–[122], Wavelet transformacije [44], [123] i Hilbert-Huang transformacije [124]. Hilbert-Huang transformacija poput Wavelet transformacije omogućava analizu signala u vremenskom i frekvencijskom području, ali je riječ o empirijskoj transformaciji. Prednosti primjene Wavelet transformacije ili Hilbert-Huangove metode u odnosu na Fourierovu transformaciju za analizu fluktuacija u VE istaknute su u [108].

Beyer i dr. [42] među prvim autorima su istraživali fluktuacije snage zbirne proizvodnje VA. Autori su primjenom Fourierove transformacije pokazali da će spektralna gustoća snage (PSD, engl. *power spectral density*) zbirne proizvodnje VA nekoreliranih fluktuacija biti smanjena $1/N_{VA}$ puta u odnosu na jedan VA,

gdje je N_{VA} broj VA. Isti rezultat za spektralnu gustoću snage je dobiven i u radu [43], pri čemu je dalje pokazano koliko iznosi prigušenje pri različitim frekvencijama.

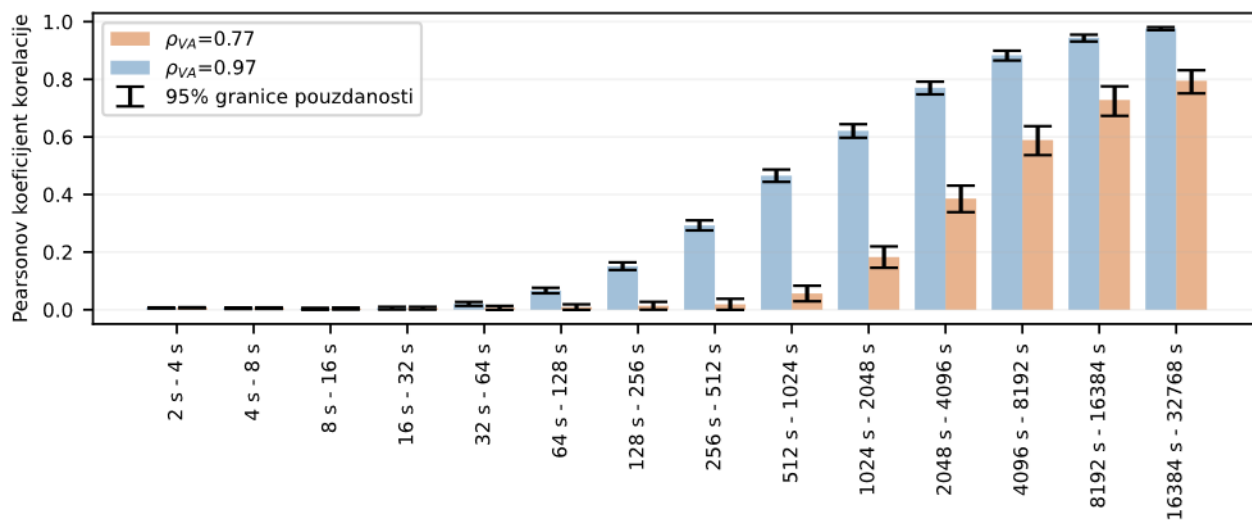
Za kvantifikaciju efekta poravnanja u sklopu ovog poglavlja, kao metrika koristit će se varijanca normaliziranih vremenskih serija. Teorijski dokaz da će varijanca normalizirane i nekorelirane vremenske serije zbirne proizvodnje VA biti $1/N_{VA}$ puta manja u odnosu na proizvodnju jednog VA prikazan je u prilogu A. Iako je efekt poravnanja jednostavno kvantificirati za nekorelirane vremenske serije, važno je pobliže razmotriti:

1. Do kojih frekvencija se vremenske serije proizvodnje VA mogu smatrati nekoreliranim?
2. Koliko iznosi prigušenje kada fluktuacije nisu potpuno korelirane, odnosno kada korelacija i dalje postoji?

Odgovor na prethodna pitanja može se dobiti analizom koeficijenta korelacije između skala istog stupnja W_j na različitim VA unutar iste VE. Koeficijent korelacije između skala MODWT-a i pripadajuće granice pouzdanosti izračunate su u Matlabu korištenjem *modwtcorr* funkcije koja je implementacija postupka izvedenog u [113].

Koeficijent korelacije na više vremenskih skala je prikazan na slici 5-10 za dva VA na lokacijama „A“ i „C“. Na lokaciji „A“, zbog kompleksnog terena, Pearsonov koeficijent korelacije između proizvodnje VA (cijele vremenske serije, a ne pojedinačnih koeficijenata) iznosi $\rho_{VA}=0,77$, a na lokaciji „C“ je vrlo visok i iznosi $\rho_{VA}=0,97$. Bez obzira na različitost terena na lokacijama i ukupnog koeficijenta korelacije između proizvodnje VA, korelacija između nižih skala odnosno koeficijenata $W_1 - W_5$ (do perioda 64 s) je približno jednaka nuli. Dakle, fluktuacije radne snage VA s periodom kraćim od 1 min mogu se smatrati nekoreliranim, neovisno o tome kolika je korelacija između proizvodnje VA.

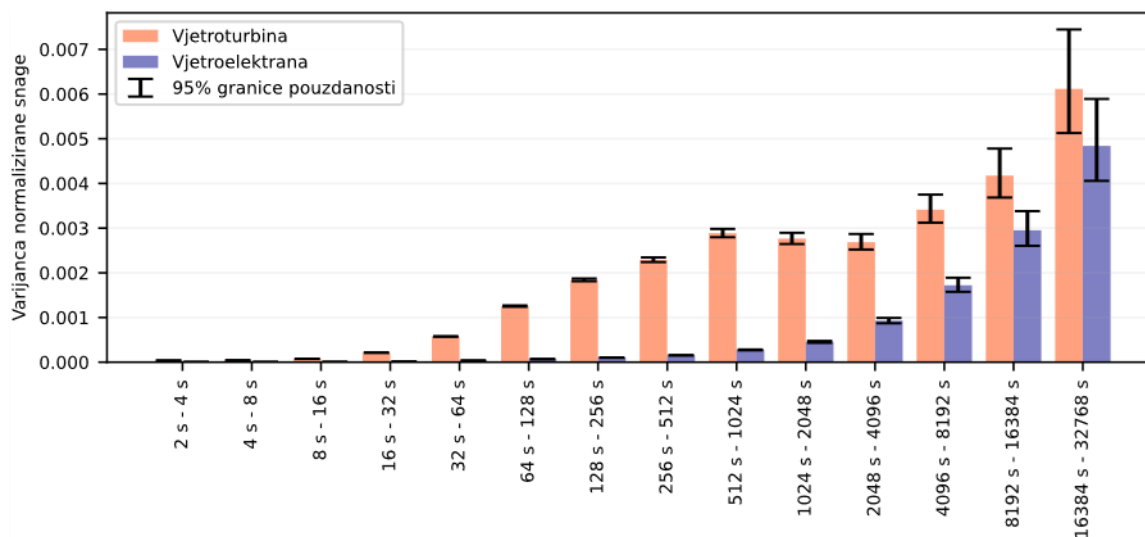
Međutim, uočava se da je kod VA između kojih postoji značajna korelacija u proizvodnji $\rho_{VA}=0,97$ (ravan teren) značajno veći porast korelacije za periode fluktuacija iznad 1 min u odnosu na drugi par VA.



Slika 5-10 Koeficijent korelacije različitih vremenskih skala između dva VA na lokaciji „A“ i „C“

Budući da je proizvodnja VA nekorelirana na kraćim vremenskim periodima, a kod fluktuacija s nižom frekvencijom koeficijent korelacije nije jednak jedinici (nema savršene korelacije), prigušenje fluktuacija kod VE je izraženije u odnosu na jedan VA. Navedeno je demonstrirano na slici 5-11, na kojoj je prikazana

varijanca normalizirane snage jednog VA i cijele VE sastavljene od 16 VA. Vremenske serije su normalizirane s nazivnom snagom VA odnosno VE kako bi se omogućila jednostavnija usporedba varijance. Kod nekoreliranih fluktuacija (praktično do vremenske skale 5, odnosno perioda fluktuacija do 64 s), varijanca normalizirane snage je 16 puta manja u odnosu na varijancu VA, dok se za više vremenske skale taj odnos postepeno smanjuje kako korelacije opada. Sa slike se primjećuje da je razlika u varijanci i dalje izražena pri periodima fluktuacija do 8192 s (cca 2,3 h).



Slika 5-11 Usporedba varijance normaliziranih vremenskih serija izlazne snage vjetroturbine i vjetroelektrane (16 vjetroturbina)

Korištenjem koeficijenta korelacije može se dobiti uvid u iznos prigušenja na različitim vremenskim skalama, ali primjena istog nije praktična kada se uspoređuje više od dva VA. Zato će se za evaluaciju efekta poravnjanja koristiti varijanca normalizirane snage zbirne proizvodnje VA. Iznos varijance ujedno se može dalje koristiti u svrhu modeliranja efekta poravnjanja.

Za svaku lokaciju „A“, „B“ i „C“ za koju su dostupni podaci proizvodnje VA, izračunata je zbirna proizvodnja N_{VA} vjetroagregata, $N_{VA} = 1, 2, \dots, N_{VE}$, gdje je N_{VE} ukupan broj VA u pripadajućoj VE. Zbirna proizvodnja je potom normalizirana s nazivnom snagom objedinjenog broja VA. Nakon primjene MODWT-a na normaliziranoj zbirnoj proizvodnji N_{VA} , izračunata je varijanca zbirne proizvodnje pri svakoj vremenskoj skali wavelet transformacije. U posljednjem koraku, izračunata je relativna varijanca:

$$\sigma_{rel,j}^2 = \frac{\sigma_{VA,N}^2\{W_j\}}{\sigma_{VA,1}^2\{W_j\}} \quad (5.10)$$

gdje su:

$\sigma_{VA,N_{VA}}^2\{W_j\}$ varijanca normalizirane zbirne proizvodnje N_{VA} vjetroagregata j -te vremenske skale,

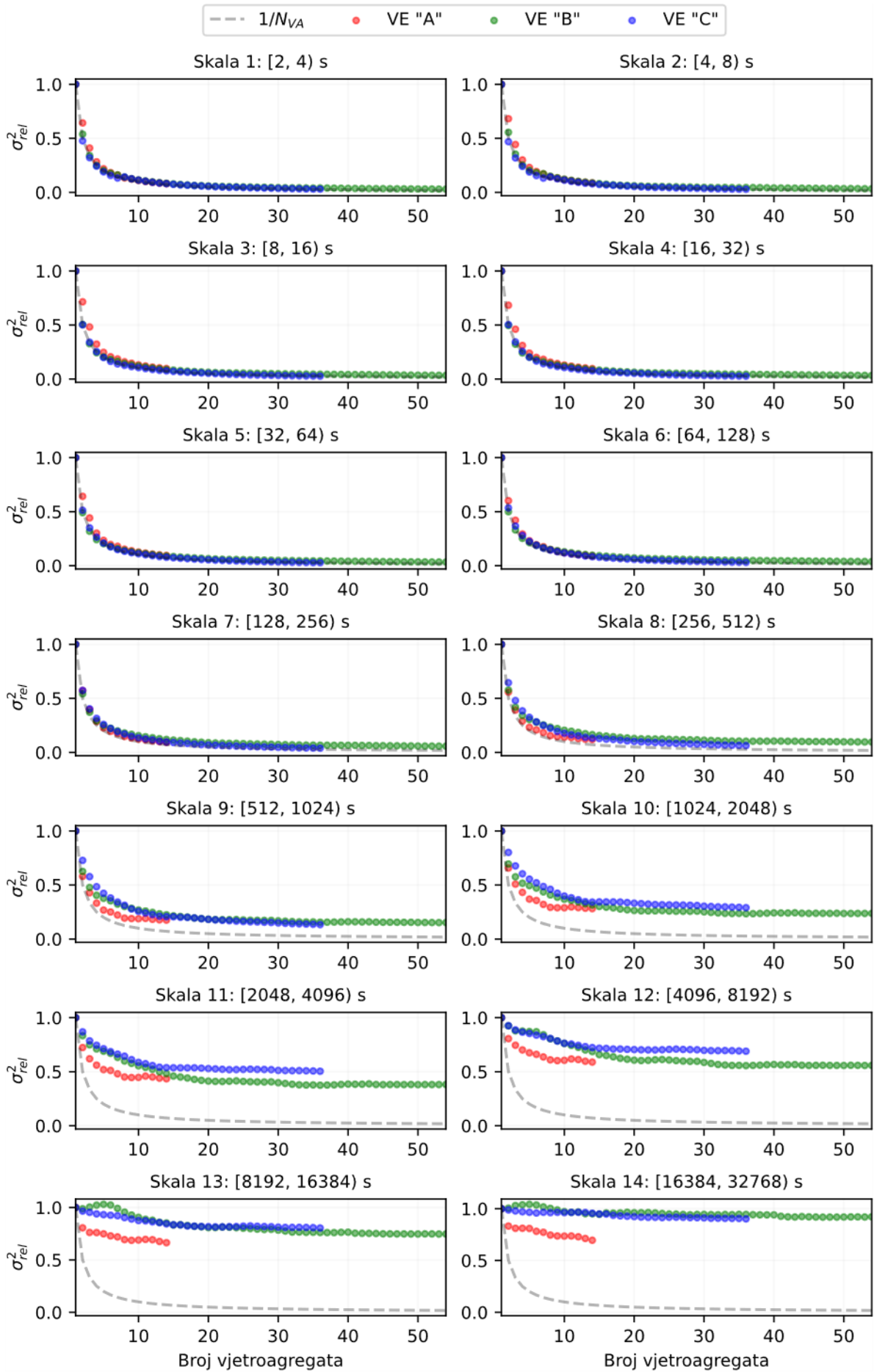
$\sigma_{VA,1}^2\{W_j\}$ varijanca normalizirane proizvodnje jednog vjetroagregata j -te vremenske skale

Dakle, relativna varijanca je bezdimenzionalna vrijednosti i predstavlja omjer dvije varijance. S obzirom da se efekt poravnjanja definira kao omjer prigušenja zbirne proizvodnje N_{VA} i proizvodnje jednog VA, ovako definirana relativna varijanca u direktnoj je vezi s efektom poravnjanja.

Slika 5-12 prikazuje relativnu varijancu prvih 14 vremenskih skala (fluktuacije proizvodnje do uključivo 32768 s, odnosno približno 9,1 h). Promjena relativne varijance prikazana je za tri vjetroelektrane „A“, „B“ i „C“ s obzirom na pripadajući broj VA. Uz dobivene vrijednosti relativne varijance označene točkicama, na svakoj vremenskoj skali prikazana je teorijska krivulja maksimalnog efekta poravnanja $1/N_{VA}$ koji odgovara relativnoj varijanci kada su fluktuacije proizvodnje nekorelirane (vidjeti prilog A).

Na prvih šest vremenskih skala relativna varijanca se vrlo dobro poklapa s teorijskom krivuljom, što potvrđuje prethodno dobivene rezultate sa slike 5-10 u kojima je pokazano da između fluktuacija s periodom kraćim od 1 min nema korelacije. Odstupanje od teorijske krivulje počinje od skale 7 te postaje sve veće prema višim skalama (duži periodi fluktuacija odnosno niže frekvencije), što znači da efekt poravnanja postaje sve slabiji.

Uočljive su i razlike između efekta poravnanja između VE. Na primjer, između VE „B“ i „C“ vrijednosti relativne varijance su preklapljene na gotovo svim skalama (odstupanje je veće na skalama >10). Rezultat je i očekivan s obzirom da su „B“ i „C“ smještene na ravnom terenu gdje postoji veća korelacija između VA. Nasuprot tome, kod VE „A“ odstupanja su značajnija. Riječ je o VE koja je smještena na kompleksnom terenu s većom udaljenosti između VA i većim razlikama između proizvodnih profila VA. Kao rezultat, općenito je uočljiv manji porast relativne varijance kod skala >6 u odnosu na VE „B“ i „C“.



Slika 5-12 Varijanca N_{VA} vjetroagregata u odnosu na jedan VA prikazano na 14 vremenskim skalama

5.3 Efekt poravnanja u sunčanim elektranama

Utjecaj zasjenjenja FN modula zbog naoblake primarni je faktor naglih promjena proizvodnje SE. Tijekom sunčanog dana varijacije proizvodnje su praktično beznačajne. Međutim, kod oblačnih dana zbog zasjenjenja FN modula proizvodnja SE može se drastično smanjiti. Ako se tijekom proizvodnje FN modul zasjeni uslijed nailaska prepreka poput oblaka, objekata u neposrednoj blizini ili susjednih redova FN nizova, proizvodnja FN modula će se drastično smanjiti. Serijski spoj FN ćelija u modulu bi podrazumijevao da će zasjenjenje jedne ćelije automatski značiti pad proizvodnje cijelog FN modula, ili još nepovoljnije, cijelog serijski spojenog FN niza povezanog na ulaz u izmjenjivač. Proizvođači FN modula su utjecaj zasjenjenja ograničili na način da se dio zasjenjenih FN ćelija može premostiti primjenom tzv. *bypass* dioda koje dijele ćelije FN modula na određenih broj dijelova (obično tri jednaka dijela). Dakle, u slučaju zasjenjenja dijela FN ćelija u modulu, gubici proizvodnje FN modula zbog zasjenjenja se mogu ograničiti na npr. 1/3 FN modula, dok će preostale nezasjenjene ćelije nastaviti s punom proizvodnjom.

Takve varijacije mogu imati nepovoljan utjecaj na planiranje rada i balansiranje elektroenergetskog sustava. Međutim, kod većih SE zbog velike prekrivene površine FN modula oblaci će redovito zasjeniti dio SE, dok će nezasjenjeni dio SE nastaviti s proizvodnjom bez većih fluktuacija. Dakle, relativno gledajući, veće fluktuacije snage mogu se očekivati kod SE manjih instaliranih snaga, budući da iste prekrivaju manju površinu. Analogno kao i kod VE, smanjenje fluktuacija snage kod većih SE u odnosu na fluktuacije snage jednog FN modula ili manje SE naziva se efekt poravnanja.

Mnogi radovi u literaturi su pokazali da će varijacije proizvodnje biti direktno povezane s površinom koju prekrivaju FN moduli i da će varijacije proizvodnje SE biti značajno prigušene u odnosu na sunčevo zračenje mjereno na piranometru [46], a osobito kod unutar-minutnih vremenskih skala [47], [48]. Većina radova u literaturi razmatra fluktuacije snage SE sa fiksnom konstrukcijom, a pritom se zanemaruje tip izmjenjivača (string ili centralni). U [125] autori su primijetili da će SE sa fiksnom konstrukcijom imati veće fluktuacije snage tijekom kraćih vremenskih intervala u odnosu na SE s jednoosnim praćenjem sunca. Također, u [126] je pokazano da su fluktuacije snage izraženije kod elektrana sa centralnim inverterima u odnosu na varijantu sa string inverterima. Međutim, prethodno navedene specifičnosti je teško uvažiti tijekom planiranja budući da iste zahtijevaju složenije modele, a upitno je koliko bi uvažavanje takvih specifičnosti doprinijelo preciznijem opisu fluktuacija.

5.3.1 Ulazni podaci

Efekt poravnanja u SE razmotren je korištenjem mjerenih podataka sunčevog zračenja i modela SE, s obzirom da operativni podaci proizvodnje SE nisu bili dostupni. Podaci korišteni za ulaz u model preuzeti su sa piranometra (komponente sunčevog zračenja) i termometra (temperatura zraka) u 1 s rezoluciji. Detaljniji opis korištene opreme prikazan je u potpoglavlju 6.1.2.

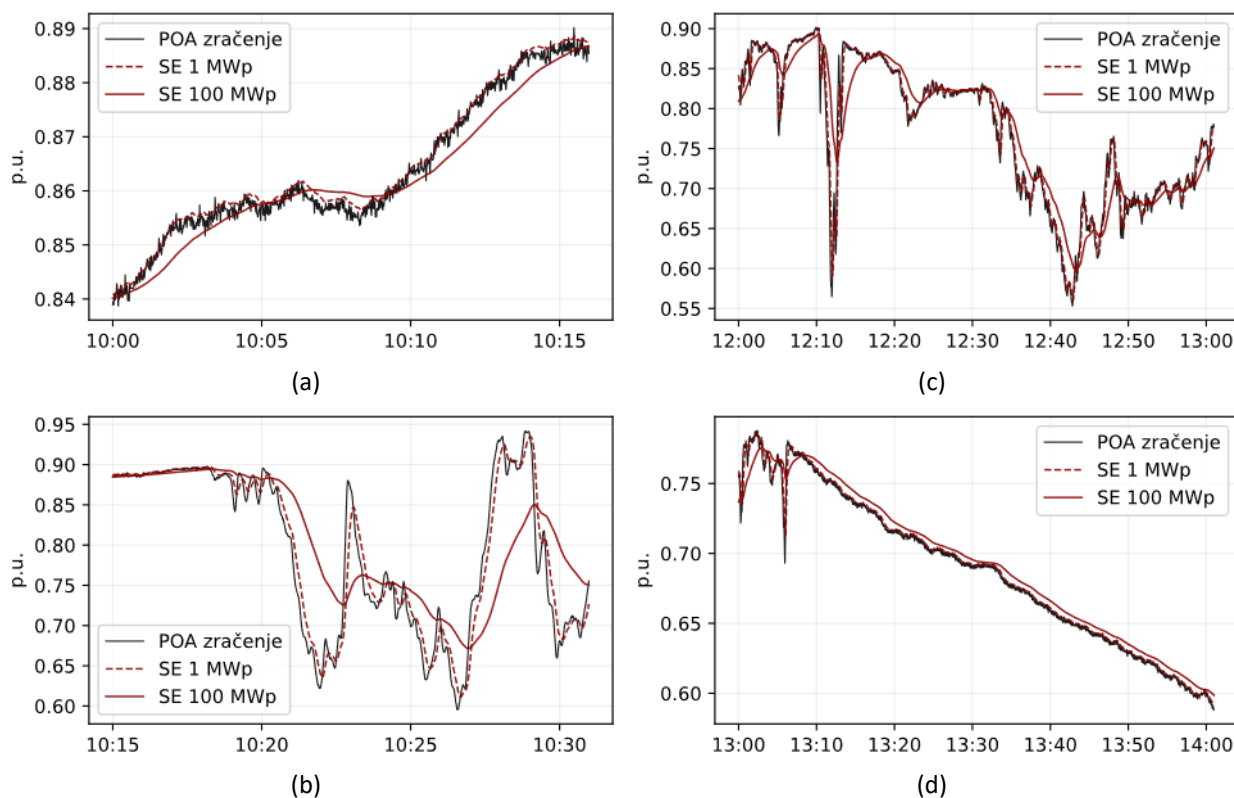
Za realistično opisivanje proizvodnje SE kod primjene visoke razlučivosti sunčevog zračenja klasični modeli SE ne mogu dati zadovoljavajuću točnost. U tu svrhu, u literaturi su razvijena dva modela [48], [49] koja uvažavaju efekt poravnanja, a oba su izvedena na temelju stvarnog ponašanja SE. Teorijski uvod u modele detaljnije je obrađen u potpoglavlju 5.5, a u nastavku je primjenom modela SE na osnovu rada [48] dobivena proizvodnja SE u visokoj vremenskoj rezoluciji.

5.3.2 Prigušenje fluktuacija u proizvodnji SE

Prigušenje fluktuacija u proizvodnji SE moguće je usporediti ako se vremenske serije sunčevog zračenja i proizvodnje SE normaliziraju, a potom prikažu usporedno na grafu. U ovom slučaju, normalizacija je provedena dijeljenjem vremenske serije s maksimalnom zabilježenom vrijednošću u promatranom vremenskom periodu.

Slika 5-13 prikazuje fluktuacije normaliziranog POA zračenja (nagib FN modula iznosi 20°) i proizvodnje SE instalirane snage 1 MWp te 100 MWp. S obzirom da je proizvodnja SE kod primjene klasičnih modela linearno proporcionalna POA zračenju, normalizirana vrijednost POA zračenju ujedno može predstavljati normaliziranu proizvodnju SE dobivenu klasičnim modelom. Usporedba je napravljena tijekom jednog dana uzimajući pojedine 15 min ili 1 h isječke. U proizvodnji SE 1 MWp primjetno je određeno prigušenje, koje je nešto izraženije tijekom naglijih promjena sunčevog zračenja, ali općenito nije značajno. Budući da su prigušene naglije promjene sunčevog zračenja, za pretpostaviti je da elektrana 1 MWp prigušuje fluktuacije snage u području viših frekvencija.

Međutim, u proizvodnji SE 100 MWp prigušenje je znatno očitije i kod sporijih fluktuacija (nižih frekvencija). Daljnja analiza fluktuacija proizvodnje SE provedena je u frekvencijskom području.



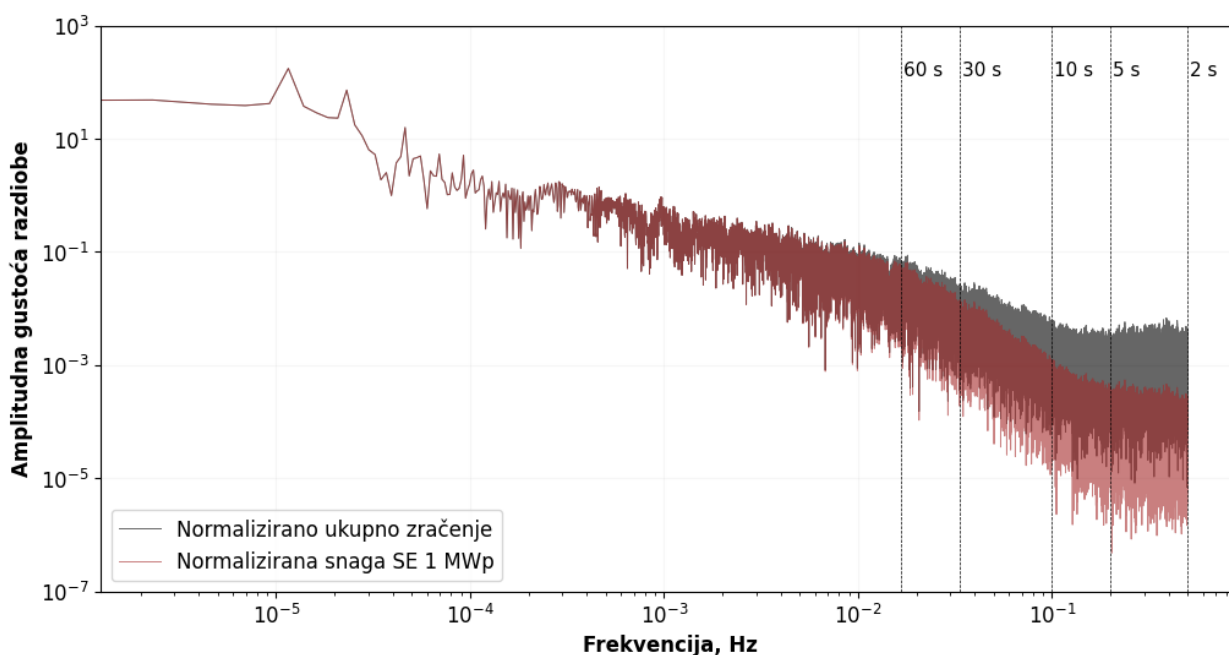
Slika 5-13 Usporedba fluktuacija normaliziranog sunčevog zračenja (POA) i proizvodnje SE 1 MWp te 100 MWp u vremenskoj domeni

5.3.3 Analiza fluktuacija primjenom Fourierove transformacije

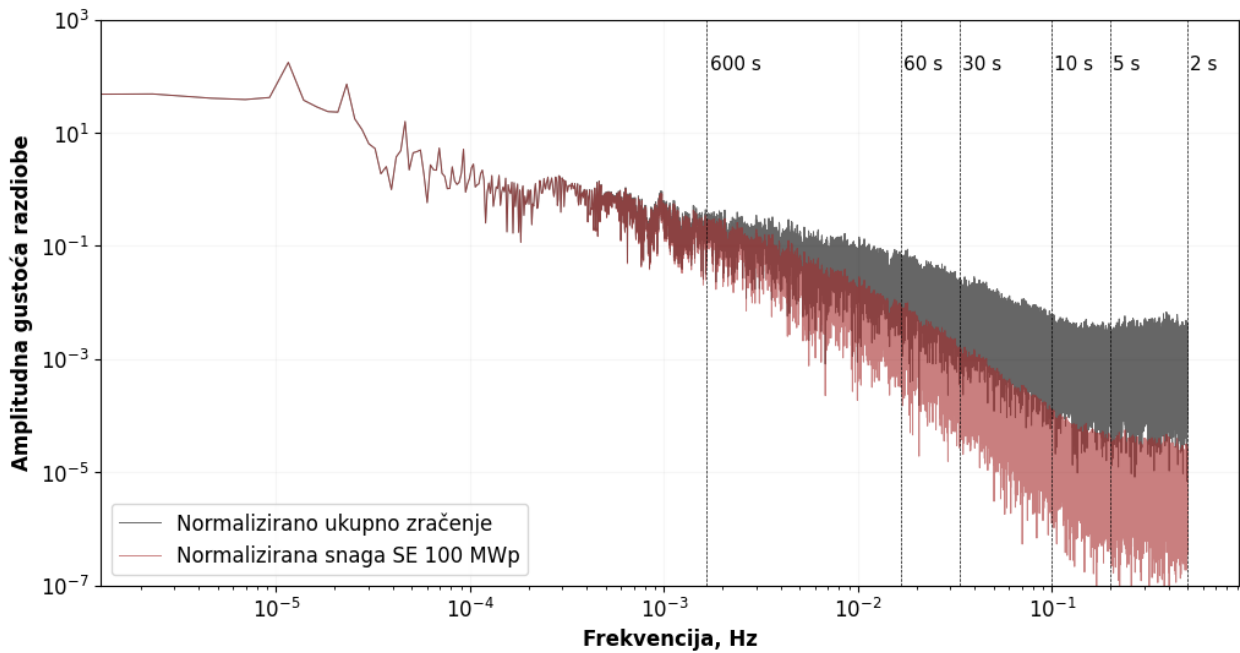
Efekt poravnanja analiziran je u frekvencijskom području primjenom Fourierove transformacije. Pomoću biblioteke scipy [127] u programskom jeziku Python procijenjena je spektralna gustoća signala normaliziranog ukupnog sunčevog zračenja i izlazne snage SE primjenom periodogram metode [128].

Normalizacija je napravljena dijeljenjem pripadajućih vremenskih nizova s maksimalnom zabilježenom vrijednosti u vremenskom nizu. Iz spektralne gustoće signala izračunata je amplitudna gustoća razdiobe (ASD, engl. *amplitude spectral density*) koja je drugi korijen iz spektralne gustoće snage. ASD je izračunata za sunčevo zračenje pod kutem FN modula te izlaznu radnu snagu SE 1 MWp i 100 MWp (normalizirane vrijednosti), a rezultati su prikazani na slikama 5-14 i 5-15. Usporedbom ASD-ova sunčevog zračenja i radne snage SE moguće je primijetiti razlike u području viših frekvencija, odnosno kraćih perioda fluktuacija. Primjetno je da prigušenje fluktuacija radne snage za SE instalirane snage 1 MWp počinje pri periodima fluktuacija oko 60 s, te je to veće što je period fluktuacija kraći. Budući da je riječ o normaliziranim vremenskim serijama, u području nižih frekvencija krivulje ASD-a sunčevog zračenja i radne snage SE se preklapaju, odnosno prigušenja fluktuacija praktično nema.

Kod SE većih instaliranih snaga (veće prekrivene površine FN modula) prigušenje fluktuacija počinje ranije, tj. pri nižim frekvencijama. Tako za SE instalirane snage 100 MWp prigušenje počinje pri periodima fluktuacija od cca 10 min (600 s).



Slika 5-14 Amplitudna spektralna gustoća normaliziranog sunčevog zračenja na zakošenu plohu i normalizirane proizvodnje SE instalirane snage 1 MWp



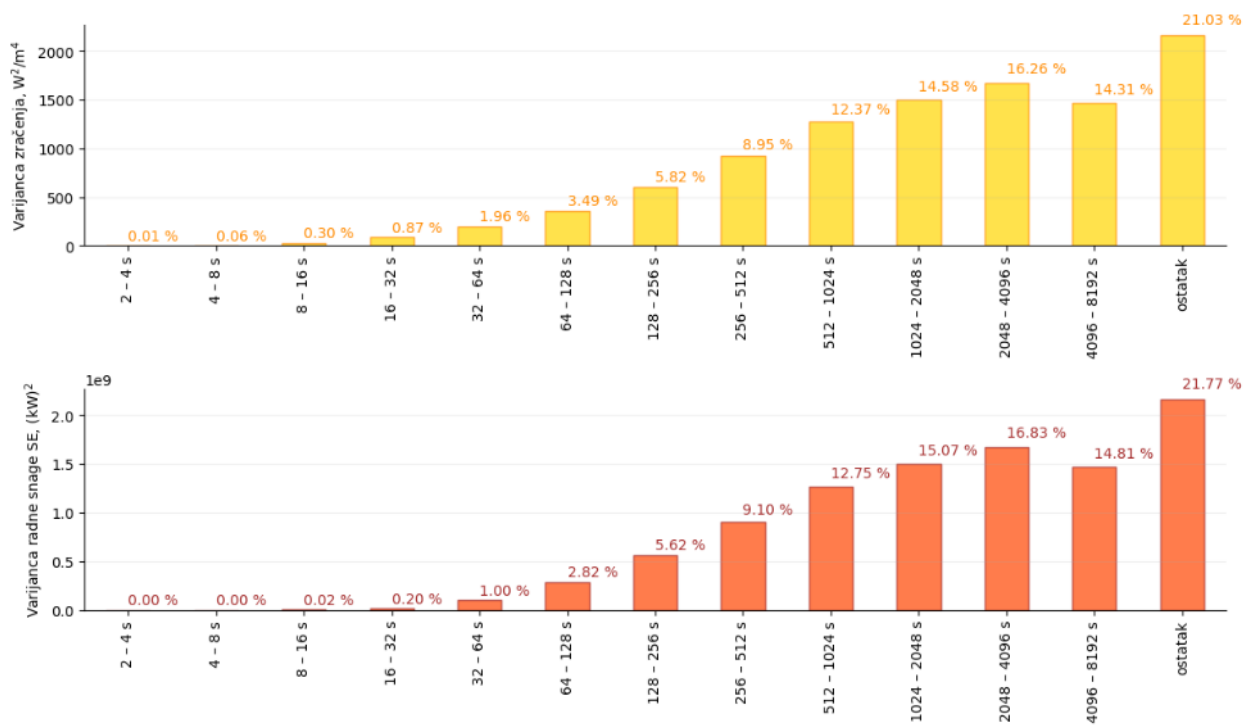
Slika 5-15 Amplitudni spektar normaliziranog sunčevog zračenja na zakošenu plohu i normalizirane proizvodnje SE instalirane snage 100 MWp

5.3.4 Analiza fluktuacija primjenom MODWT-a

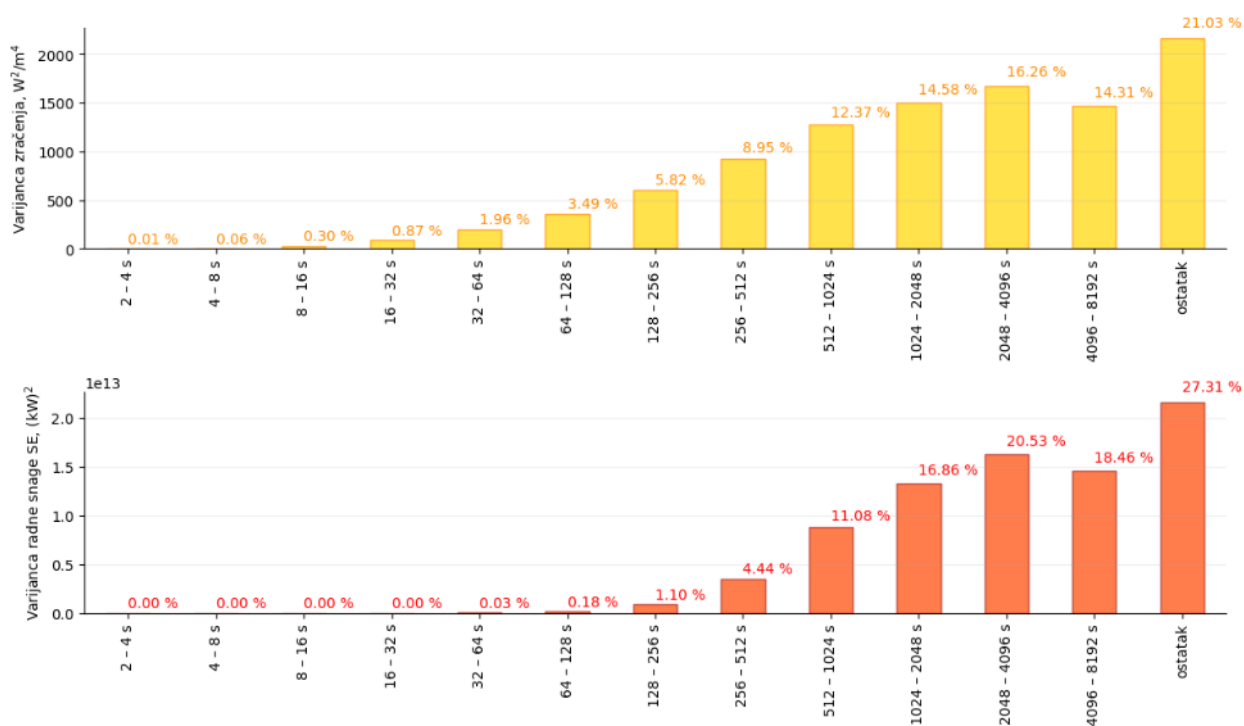
Efekt poravnanja može se razmatrati i primjenom MODWT-a, na sličan način kao što je to napravljeno za VE. Ako se MODWT primijeni na vremenskim nizovima sunčevog zračenja i proizvodnje SE instaliranih snaga 1 MWp i 100 MWp, te potom procjeni varijanca (pristrana procjena varijance prema [119]) pojedine vremenske skale, dobivaju se rezultati prikazani na slikama 5-16 (za SE 1 MWp) i 5-17 (za SE 100 MWp).

Moguće je primijetiti da je varijanca sunčevog zračenja na vremenskim skalama kratkih perioda relativno mala u odnosu na ukupnu varijancu. Iz istog razloga, prigušenje varijance u SE nije toliko uočljivo. Međutim, primjetno je da je varijanca izlazne radne snage SE značajno prigušena na vremenskim skalama s fluktuacijama do 32 s za SE 1 MWp, a za SE 100 MWp do 128 s.

Ako se napravi usporedba smanjenja varijance s rezultatima dobivenim za VE, uočava se da je prigušenje kod SE manje izraženo nego kod VE. Međutim, za relevantniju usporedbu potrebna je detaljnija analiza zasnovana na operativnim podacima VE i SE na duljim vremenskim periodima.



Slika 5-16 Varijanca sunčevog zračenja (prvi red) i izlazne radne snage SE 1 MWp (drugi red) pripadajućih vremenskih skala MODWT-a



Slika 5-17 Varijanca sunčevog zračenja (prvi red) i izlazne radne snage SE 100 MWp (drugi red) pripadajućih vremenskih skala MODWT-a

5.4 Model proizvodnje vjetroelektrana kod visokih vremenskih rezolucija

U sklopu ovog potpoglavlja razvijen je model vjetroelektrane koji će se primjenjivati za generiranje vremenske serije proizvodnje VE. S obzirom da je u potpoglavlju 5.2.2 pokazano da je primjena P-

karakteristike VA za modeliranje proizvodnje VA neopravdana kod visoke razlučivosti brzine vjetra, a podaci brzine vjetra mjereni na gondoli VA imaju visoku nepouzdanost, modeliranje vjetroelektrane je provedeno direktnim korištenjem proizvodnje VA. Time se nadilazi nesigurnost u točnosti podataka i kompleksnost dinamike proizvodnje VA. Iako u literaturi postoje brojni modeli VE, predloženi model pojašnjen u nastavku je specifično namijenjen za proračun odbačene proizvodnje pri visokim vremenskim rezolucijama.

5.4.1 Varijacije proizvodnje pri različitim frekvencijskim skalama

Varijacije proizvodnje u širem frekvencijskom rasponu analizirane su primjenom MODWT-a, odnosno multirezolucijske analize temeljene na MODWT-u. Kao metrika za kvantizaciju fluktuacija proizvodnje korišten je indeks efekta poravnanja (SEI, engl. *smoothing effect index*), definiran kao omjer standardne devijacije zbirne proizvodnje VA i jednog VA [45]. Potrebno je navesti da je SEI zapravo drugi korijen iz relativne varijance definirane u potpoglavlju 5.2.3. Međutim, SEI se razmatra kao omjer standardnih devijacija nenormaliziranih vremenskih serija proizvodnje. Ovakva prilagodba SEI-a prikladnija je za modeliranje.

Ideja iza primjene MODWT-a za analizu varijacija proizvodnje je rasčlanjenje vremenske serije jednog ili više VA na različite vremenske skale, gdje svaka vremenska skala prikazuje fluktuacije proizvodnje odgovarajućeg frekvencijskog raspona. Primjenom SEI-a na svakoj od rasčlanjenih vremenskih serija dobiva se kvantitativna mjera fluktuacija svake od vremenskih skala.

Korišteni postupak za analizu fluktuacija proizvedene snage zbirne proizvodnje VA proveden je:

- izračunom zbirne proizvodnje N_{VA} vjetroagregata, $N_{VA} = 1, 2, \dots, N_{VE}$, gdje je N_{VE} ukupan broj VA u VE
- za svaki N_{VA} , primijenjen je MODWT za dobivanje više vremenskih skala zbirne proizvodnje VA,
- procijenjena je varijanca prema postupku [119] za svaku vremensku skalu i
- izračunat je SEI pojedinačne vremenske skale.

Grafički prikaz tako navedenog postupka prikazan je na slici 5-18. Ovako definirani SEI (nenormalizirana varijanta) se povećava s povećanjem broja VA u VE, dok bi se normalizirana varijanta SEI-a smanjivala s povećanjem broja VA. Primjetno je da je porast SEI-a manji pri nižim skalama (npr. prvih devet skala) u odnosu na više skale (npr. skale veće od 10), što potvrđuje činjenicu da je prigušenje snažnije u području viših frekvencija. Jednostavniji uvid u funkciju porasta SEI-a pri različitim vremenskim skalama dobiven je primjenom interpolacijske funkcije $SEI = N_{VA}^{\alpha}$, gdje je novouvedeni parametar α nazvan eksponentom prigušenja. Za svaku vremensku skalu, parametar α je dobiven metodom najmanjih kvadrata, odnosno prilagodbom funkcije N_{VA}^{α} na način da se smanji pogreška između ostvarenog (računatog) SEI-a i izvedenog SEI-a iz interpolacijske funkcije.

Sa slike je moguće uočiti da se eksponent prigušenja pri skalama 1 – 8 kreće u rasponu blizu vrijednosti $\alpha=0,5$, dok je kod viših skala (nižih frekvencija) taj koeficijent $\alpha \approx 1$ počevši od skale 14 ili 15. Između navedenih skala, tj. između 8 – 14 skale vrijednost koeficijenta α je između 0,5 i 1,0 s uzlaznim trendom.

Ovdje je potrebno i povući analogiju s rezultatima relativne varijance u potpoglavlju 5.2.3. Relativna varijanca kao omjer normaliziranih varijanci zbirne proizvodnje VA i proizvodnje jednog VA u području viših frekvencija (tj. nekoreliranih fluktuacija sukladno dokazu iz priloga A) teži prema $1/N_{VA}$. Kada bi se

radilo o nenormaliziranoj varijanti relativne varijance, omjer bi u području viših frekvencija bio jednak N_{VA} . Budući da je SEI drugi korijen iz relativne varijance, nenormalizirana varijanta SEI-a je jednaka $N_{VA}^{0,5}$.

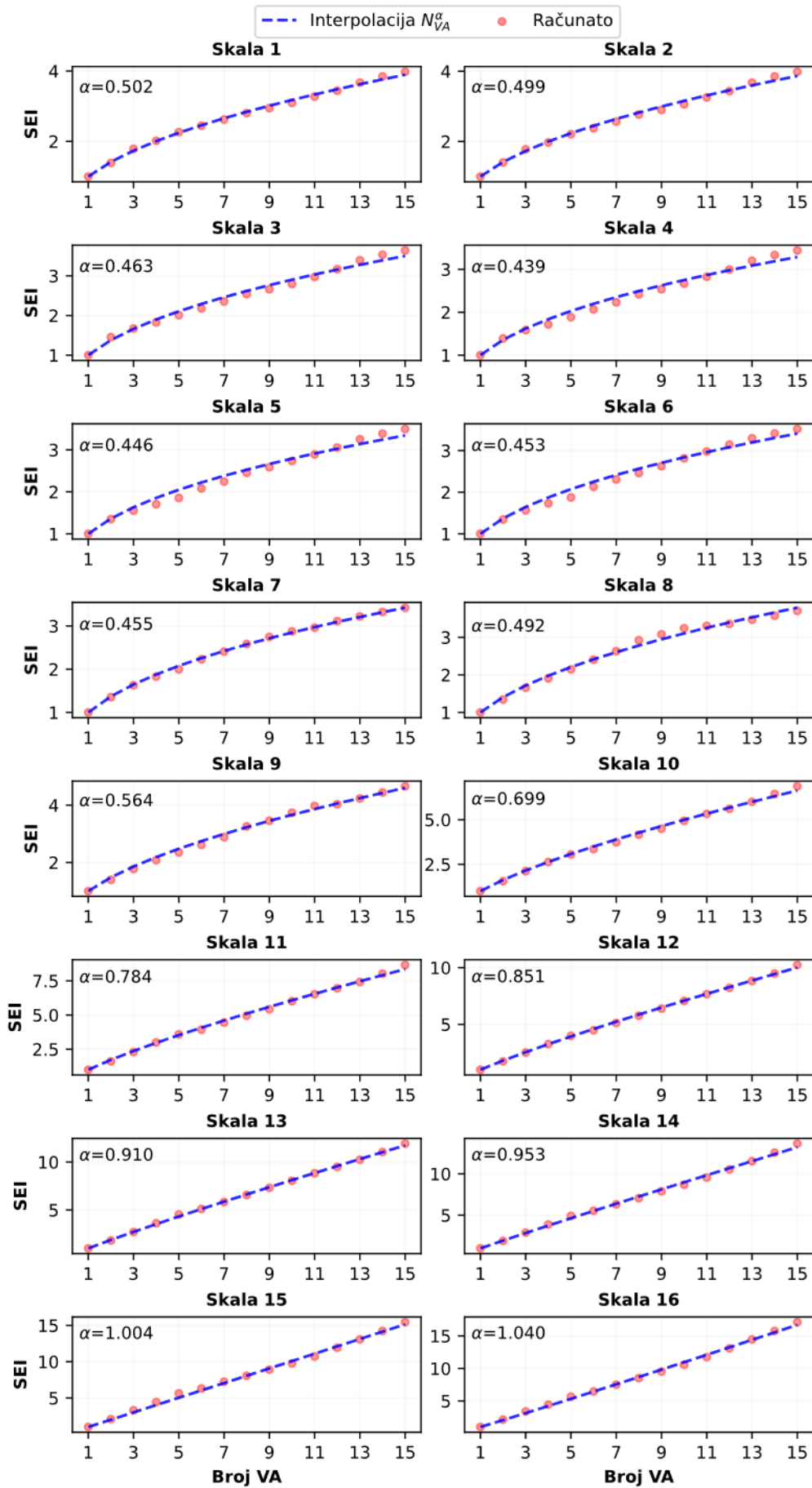
Navedeni efekt se može protumačiti na sljedeći način:

- Kod nižih frekvencija, tj. pri skalama 14 ili većim, povećanje SEI-a je linearno proporcionalno broju VA, što znači da će standardna devijacija zbirne proizvodnje N_{VA} vjetroagregata biti N_{VA} puta veća u odnosu na jedan VA. Dakle, u ovom frekvencijskom području kod vjetroelektrane nema prigušenja fluktuacija proizvodnje. Period fluktuacija pri skali 14 iznosi 16384 s – 32768 s.
- U području viših frekvencija do uključivo skale reda 8, povećanje SEI-a je proporcionalno drugom korijenu od broja VA, što odgovara teorijski maksimalnom prigušenju fluktuacija. Navedene fluktuacije su značajno prigušene, a riječ je o periodima fluktuacija do 512 s.
- U području između dva ekstrema, tj. pri fluktuacijama s periodom između 512 s i 16384 s prigušenje fluktuacija je moguće uočiti, a to je veće što je period fluktuacija kraći. Ove fluktuacije također su obuhvaćene eksponentom prigušenja.

Potrebno je napomenuti da su navedene krivulje dobivene na VA koji su tijekom pogona u pojedinim intervalima imali značajnije razlike u proizvodnji. Kako bi se izostavili VA koji su u razmatranom periodu imali značajna odstupanja u odnosu na prosječnu proizvodnju (npr. zbog kvarova), za svaki period izračunata je prosječna proizvodnja svakog VA, μ_{VA} , te ukupni prosjek proizvodnje svih VA, μ_{VE} . Zatim su iz daljnje analize odbačeni oni VA čija je prosječna proizvodnja odstupala 1,5 puta standardne devijacije prosječne proizvodnje svih VA, σ_{VE} :

$$\mu_{VA} \in [\mu_{VE} - 1,5 \cdot \sigma_{VE}, \mu_{VE} + 1,5 \cdot \sigma_{VE}] \quad (5.11)$$

Tijekom svakog mjeseca zabilježen je jedan ili dva VA koji su se nalazili izvan granica definiranih prethodnom jednadžbom.



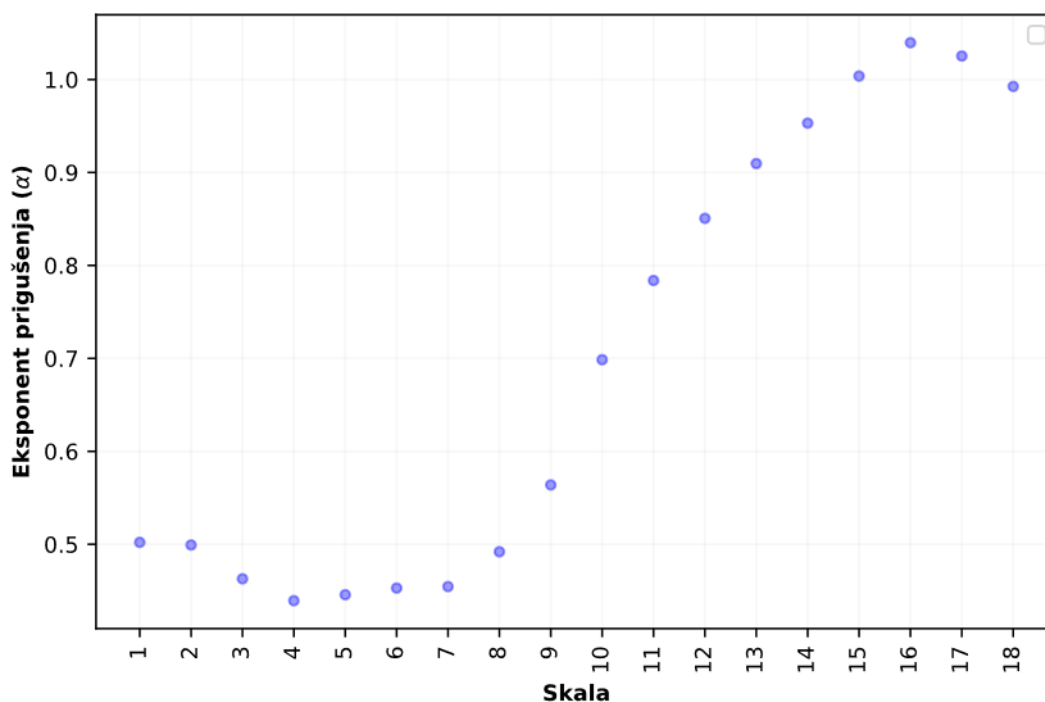
Slika 5-18 Indeks efekta poravnjanja (SEI) u ovisnosti o broju vjetroagregata u vjetroelektrani, prikazan na skalama 1 – 16

Eksponenti prigušenja po vremenskim skalama preglednije su prikazani na slici 5-19. Primjećuje se da eksponenti prigušenja na pojedinim skalama prelaze granice $\alpha \in [0,5-1,0]$. Vrijednosti eksponenta prigušenja $<0,5$ značilo bi da je na navedenim skalama prigušenje veće u odnosu na prigušenje fluktuacija dviju nekoreliranih vremenskih serija, zbog čega se takve vrijednosti zaključuju na vrijednost 0,5. Isto vrijedi i za eksponente prigušenja >1 koji neznatno prijelaze vrijednost 1,0 i čija je vrijednost zaokružena na 1,0. Tako korigirane vrijednosti eksponenata prigušenja prikazane su na slici 5-20.

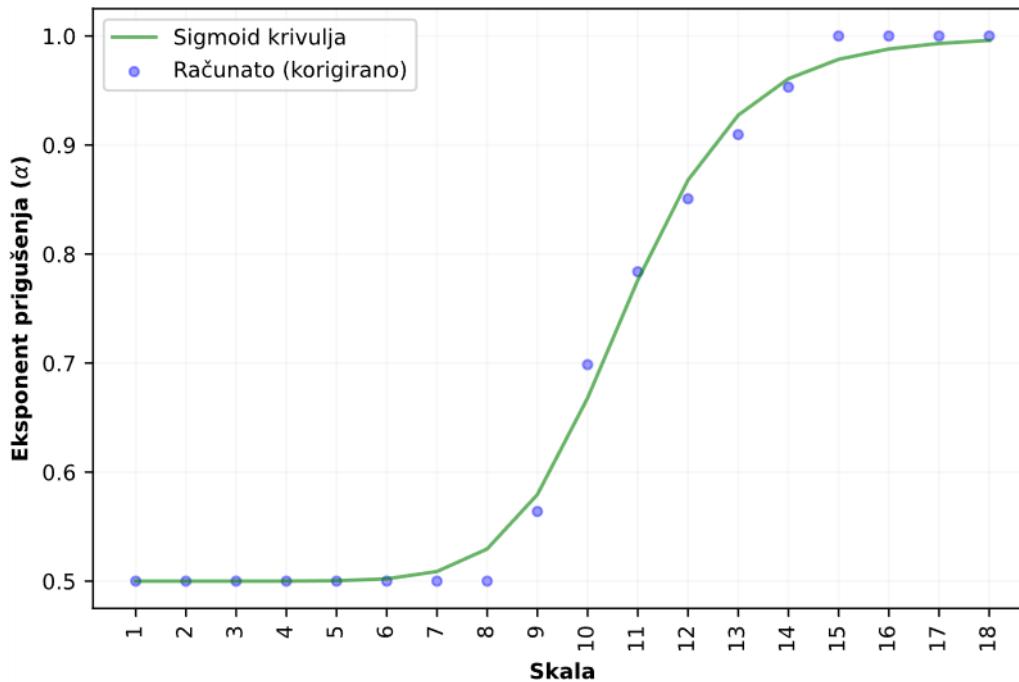
Promjena eksponenata prigušenja može se opisati primjenom Sigmoid krivulje (tzv. „S“ krivulje) koja sadrži dva parametra a i b :

$$S(a, b) = 1 - \frac{0,5}{1 + \left(\frac{x}{a}\right)^b} \quad (5.12)$$

Parametri „S“ krivulje dobivaju se primjenom metode najmanjih kvadrata odstupanja, tj. interpolacijom Sigmoid krivulje kroz korigirane vrijednosti eksponenata prigušenja.



Slika 5-19 Vrijednosti eksponenta prigušenja (α) pri različitim skalama za travanj 2021.

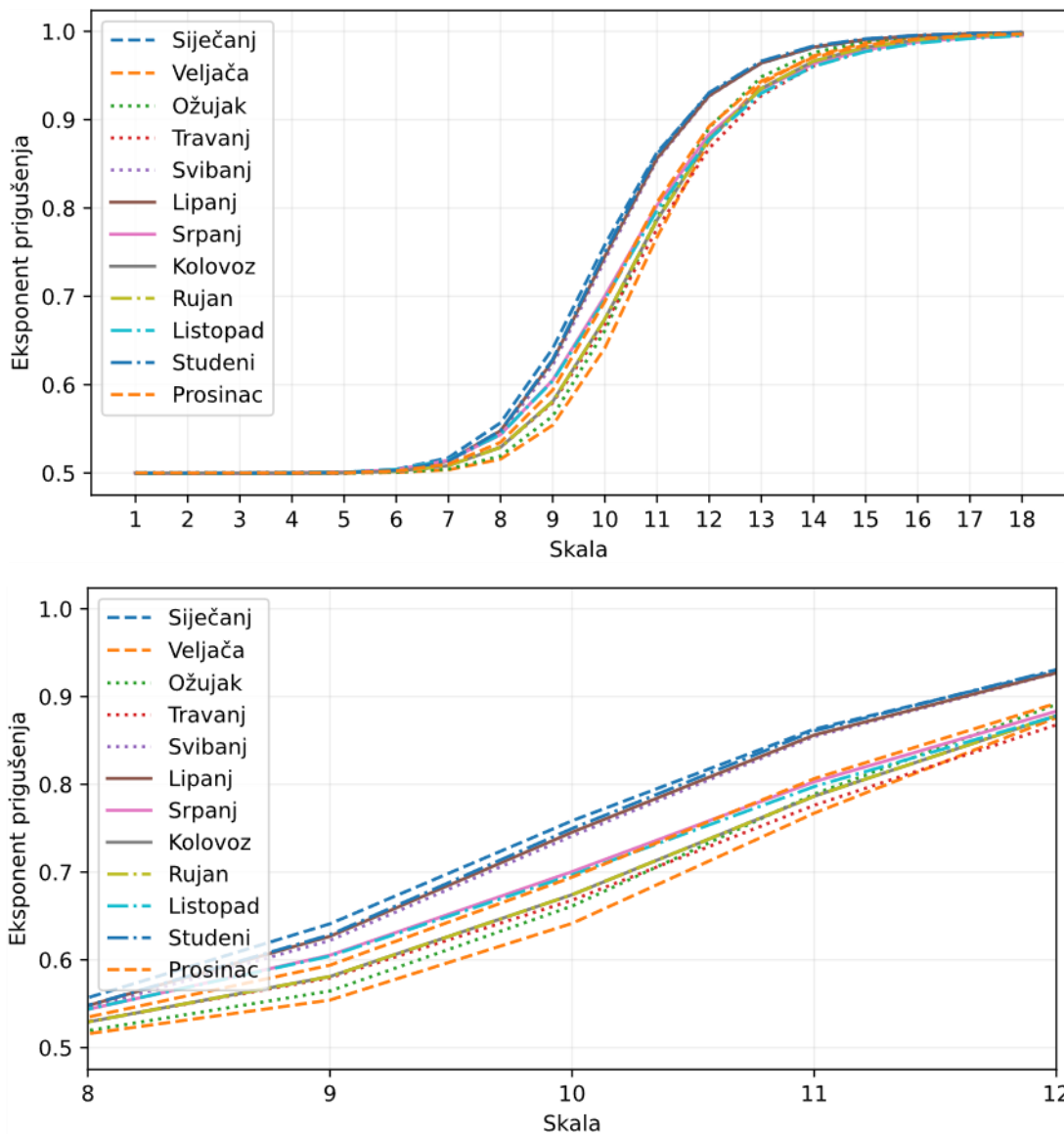


Slika 5-20 Korigirane vrijednosti eksponenta prigušenja i interpolacija Sigmoid krivuljom

Slični rezultati dobiveni su i primjenom Fourierove transformacije [42], [43]. Naime, autori su pokazali da se teorijski maksimalni efekt prigušenja javlja pri periodu fluktuacija do približno 100 s, neovisno o broju VA u VE. Navedeni period fluktuacija je najbliži sedmoj vremenskoj skali ($2^7=128$), što odgovara eksponentu prigušenja 0,5, nakon čega se prigušenje povećava daljnjim povećanjem vremenske skale odnosno povećanjem perioda fluktuacija.

EkspONENTI prigušenja pokazuju i sezonski utjecaj, a ovise i o karakteristikama terena na kojem se nalazi VE. U slučaju kompleksnog terena kakav je na analiziranoj lokaciji VE, karakteristika ima izduženiji oblik, tj. prirast eksponenta s vrijednosti cca 0,5 počinje na većim skalama u odnosu na slučaj kada se VE nalazi na ravnom terenu. Dakle, kod kompleksnog terena općenito se očekuje veće prigušenje varijacija proizvodnje što se preko eksponenta prigušenja odražava manjim porastom i iznosom u odnosu na iste skale kod VE na ravnom terenu. Veće prigušenje posljedica je smanjenja korelacije u proizvodnji susjednih VA smještenih na neravnom terenu u odnosu na iste VA na ravnom terenu.

Varijacije eksponenta prigušenja po mjesecima prikazane su na slici 5-21 korištenjem „S“ krivulja. Za svaki mjesec, interpolacijom na proračunatim i korigiranim eksponentima prigušenja dobiveni su parametri „S“ krivulje, na temelju kojih je konstruirana krivulja po mjesecima. Može se zaključiti da je pri pojedinim skalama najveće vrijednosti eksponenta prigušenja (najmanje prigušenje fluktuacija) u siječnju, lipnju i studenom, dok su najmanje vrijednosti u veljači, ožujku i travnju.



Slika 5-21 Promjene eksponenata prigušenja po mjesecima za VE smještene na kompleksnom terenu

5.4.2 Skaliranje proizvodnje vjetroagregata

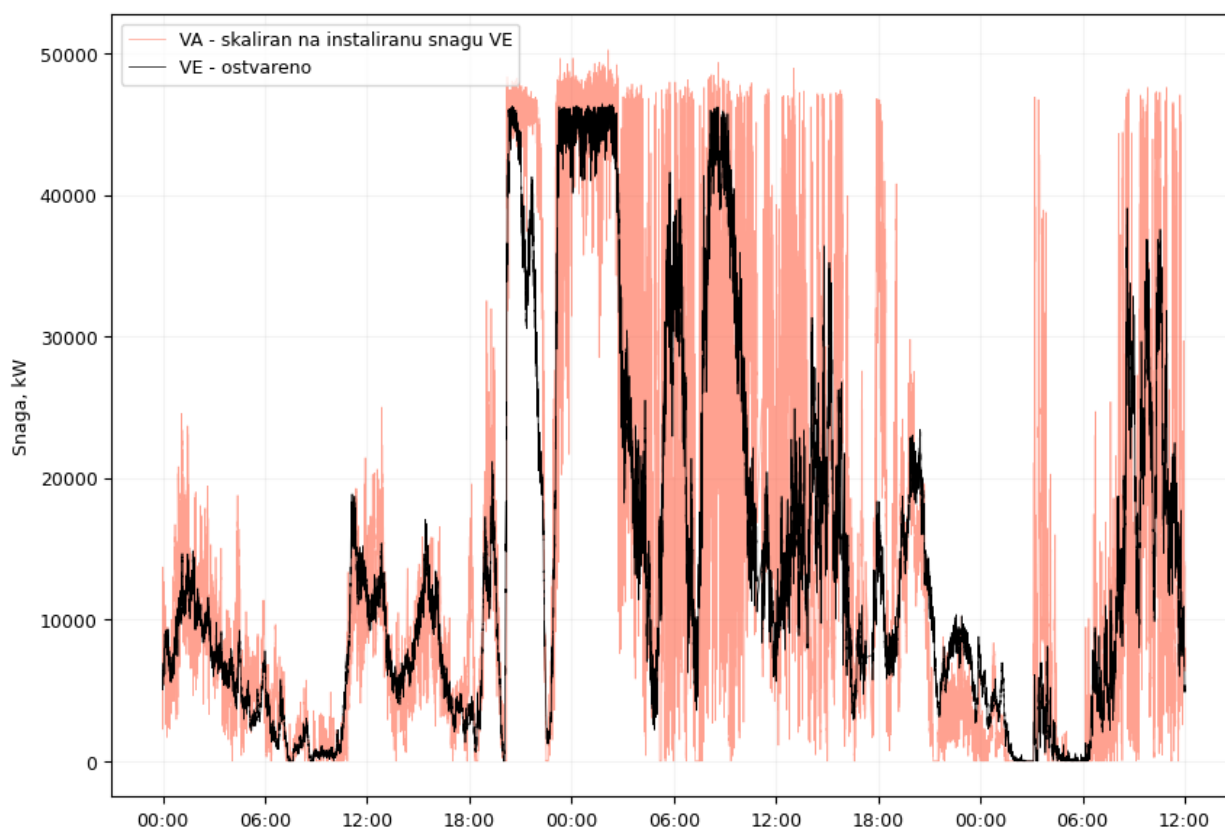
Kod rada s operativnim podacima VE prvotno ograničenje je ukupna instalirana snaga VE, odnosno broj VA u VE. U pojedinim periodima dio VA može biti i izvan pogona (npr. zbog održavanja, kvarova i drugih operativnih specifičnosti), što će dodatno umanjiti fleksibilnost analize. Kao što je pokazano u prethodnim potpoglavljima, veća instalirana snaga VE ima utjecaj na smanjenje varijacija proizvodnje u području viših frekvencija, a isto je bitno za kasniju analizu odbačene proizvodnje pri različitim vremenskim rezolucijama.

Jedan od načina za rješavanje problema ograničene instalirane snage je izvedba modela VE kojim će se omogućiti proizvodno skaliranje proizvodnje (instalirane snage) jednog ili više VA na cjelobrojne višekratnike nazivne snage VA. Međutim, proces skaliranja nije linearan, odnosno pri skaliranju je potrebno uvažiti efekt poravnjanja u VE i utjecaj istog na smanjenje visokofrekvencijskih fluktuacija, u slučaju da se analiza provodi u području viših vremenskih rezolucija.

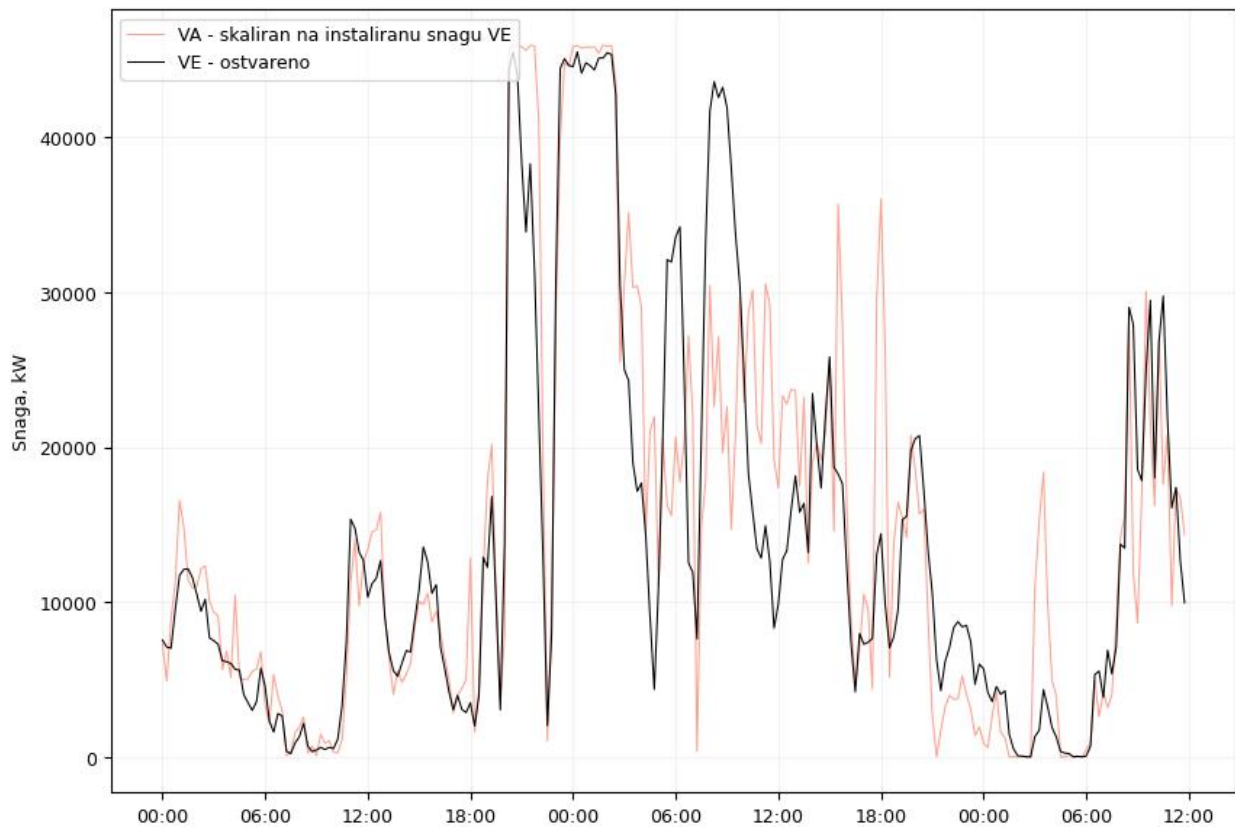
5.4.2.1 Pojednostavljeni postupak skaliranja proizvodnje VA

Skaliranje proizvodnje VA na instaliranu snagu VE, provedeno množenjem vremenskog niza radne snage vjetroagregata s brojem vjetroagregata u VE može rezultirati značajnim odstupanjima u odnosu na ostvarenu proizvodnju vjetroelektrane. Naime, takvo skaliranje apriori pretpostavlja identične proizvodne profile svih VA u VE, što u stvarnosti nije slučaj.

Na slici 5-22 ilustriran je problem skaliranja s konstantom u kojem se proizvodnja jednog VA skalira na instaliranu snagu VE kod primjene viših vremenskih rezolucija. Za demonstraciju je preuzeta vremenska serija proizvodnje VA te zbirna proizvodnja 16 VA (ostvarena proizvodnja VE prije gubitaka), sve u 1 sekundnoj rezoluciji tijekom perioda od 60 sati. Uspoređujući ostvarenu proizvodnju i proizvodnju dobivenu skaliranjem snage VA na instaliranu snagu VE, uočavaju se značajne razlike u proizvodnji. Takve razlike su prisutne kod viših vremenskih rezolucija, dok se iste značajno smanjuju kada se primjenjuju niže vremenske rezolucije poput 15 min, što je moguće primijetiti na slici 5-23. Razlike između proizvodnje VE i proizvodnje VA skaliranog na instaliranu snagu VE sada nisu posljedica efekta poravnivanja (koji nema znatnijeg učinka pri nižim frekvencijama fluktuacija), već različitosti iznosa brzine vjetra na pojedinim vjetroagregatima.



Slika 5-22 Skaliranje proizvodnje VA na instaliranu snagu VE u 1 s rezoluciji



Slika 5-23 Skaliranje proizvodnje VA na instaliranu snagu VE u 15 min rezoluciji

Prethodna ilustracija ukazuje na činjenicu da će modeli VE zasnovani na proizvodnji skaliranog VA unijeti značajniju pogrešku u fluktuacijama, a da pogreška primarno ovisi o korištenoj vremenskoj rezoluciji. Kada se koriste više vremenske rezolucije, ovakvim skaliranjem će se uvesti veća pogreška.

5.4.2.2 Predloženi postupak skaliranja

Predloženi postupak skaliranja proizvodnje jednog ili više VA kod primjene viših vremenskih rezolucija je opisan u nastavku. Osnovni cilj predloženog postupka je skalirati proizvodnju VA na način da se zadrže svojstva fluktuacija proizvodnje, ali bez uvođenja pogreške u spektru viših frekvencija. Kako bi se isto provelo, korištena su saznanja o varijacijama proizvodnje pri različitim frekvencijama izvedena iz prethodnog potpoglavlja.

U tu svrhu, primjenjuje se multirezolucijska analiza temeljena na MODWT-u. U prvom koraku, vremenska serija proizvodnje jednog VA se raščlanjuje na ukupno J_0+1 vremenskih serija primjenom MODWT-a. Broj vremenskih serija J_0 ovisi o duljini razmatranog vremenskog niza, a za period od jednog do četiri mjeseca u 1 sekundnoj rezoluciji uzima se $J_0=15$ vremenskih serija, što je dovoljno za razmatranje fluktuacija u širem frekvencijskom području (period fluktuacija $2^{15} s = 32768 s$, odnosno cca 9 h). Svaka raščlanjena vremenska serija ima istu duljinu kao i originalni vremenski niz (vremenska serija proizvodnje VA).

U drugom koraku, primjenjuje se multirezolucijska analiza (MRA) na raščlanjenim vremenskim serijama, čime se opet dobiva J_0 vremenskih serija ($D_1, D_2, \dots, D_{J_0}, S_{J_0}$) koje imaju aditivno svojstvo. Drugim riječima, suma svih raščlanjenih vremenskih serija rezultirat će originalnim vremenskim nizom radne snage VA:

$$P_t^{VA} = S_{J_0,t}^{VA} + \sum_{j=1}^{J_0} D_{j,t}^{VA} \quad (5.13)$$

gdje su:

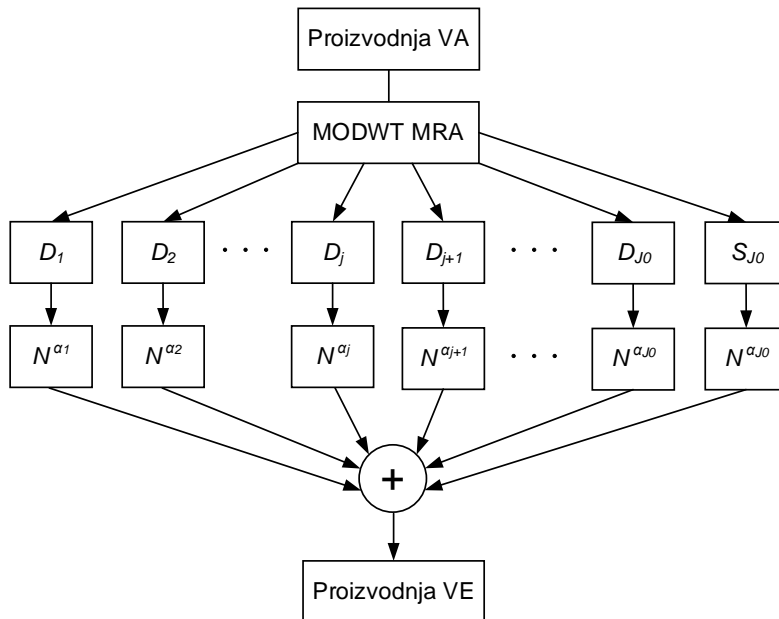
$D_{j,t}^{VA}$ detaljni koeficijenti MODWT MRA proizvodnje VA vremenske skale j u diskretnom trenutku t ,

$S_{J_0,t}^{VA}$ koeficijenti posljednje razine (J_0) MODWT MRA proizvodnje VA u diskretnom trenutku t .

Tako pripremljene vremenske serije moguće je skalirati s brojem VA primjenom pripadajućih eksponenta prigušenja dobivenih tijekom analize varijacija proizvodnje pri različitim frekvencijskim skalama u potpoglavlju 5.4.1. Budući da je u eksponentima prigušenja uključen efekt poravnanja, proizvodnja tako dobivenog modela uključuje efekt poravnanja u VE. Postupak skaliranja je prikazan na slici 5-24. Sa slike slijedi da se modelirana proizvodnja VE može matematički izraziti primjenom sljedeće jednačbe:

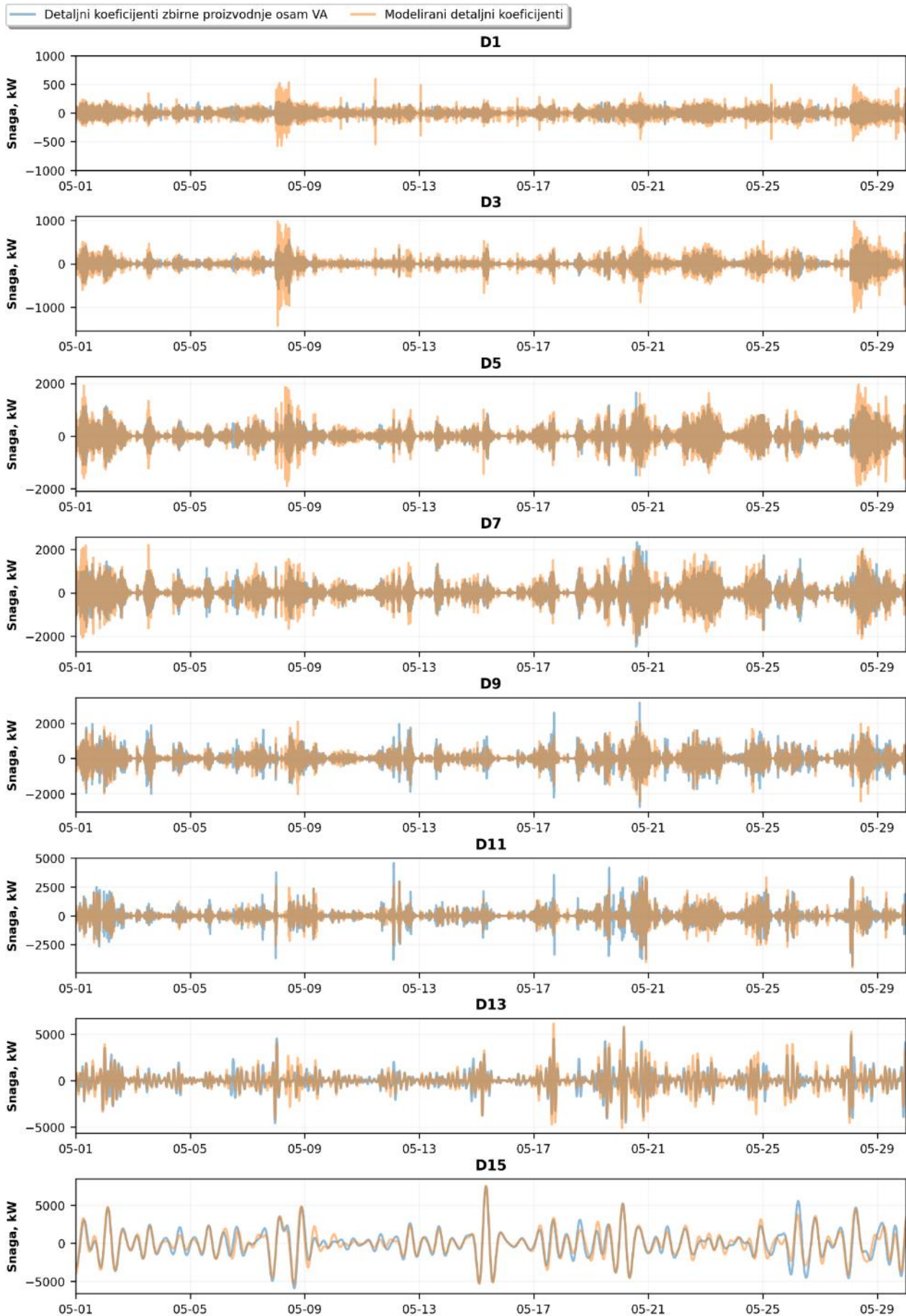
$$P_t^{VE} = S_{J_0,t}^{VA} \cdot N^{\alpha_{J_0}} + \sum_{j=1}^{J_0} D_{j,t}^{VA} \cdot N^{\alpha_j} \quad (5.14)$$

Što je manji eksponent prigušenja $\alpha \in [0,5 - 1]$, prigušenje na pripadajućoj vremenskoj skali je veće. Budući da MODWT MRA rezultira aditivnom transformacijom, dozvoljeno je zbrajanje pripadajućih vremenskih skala korigiranih s brojem VA i eksponentom prigušenja.



Slika 5-24 Metoda skaliranja proizvodnje VA na proizvodnju VE primjenom multirezolucijske analize temeljene na MODWT-u

Usporedba detaljnih koeficijenata MODWT MRA ostvarene zbirne proizvodnje osam VA i modela prikazana je na slici 5-25 za neparne vremenske skale 1 – 15.



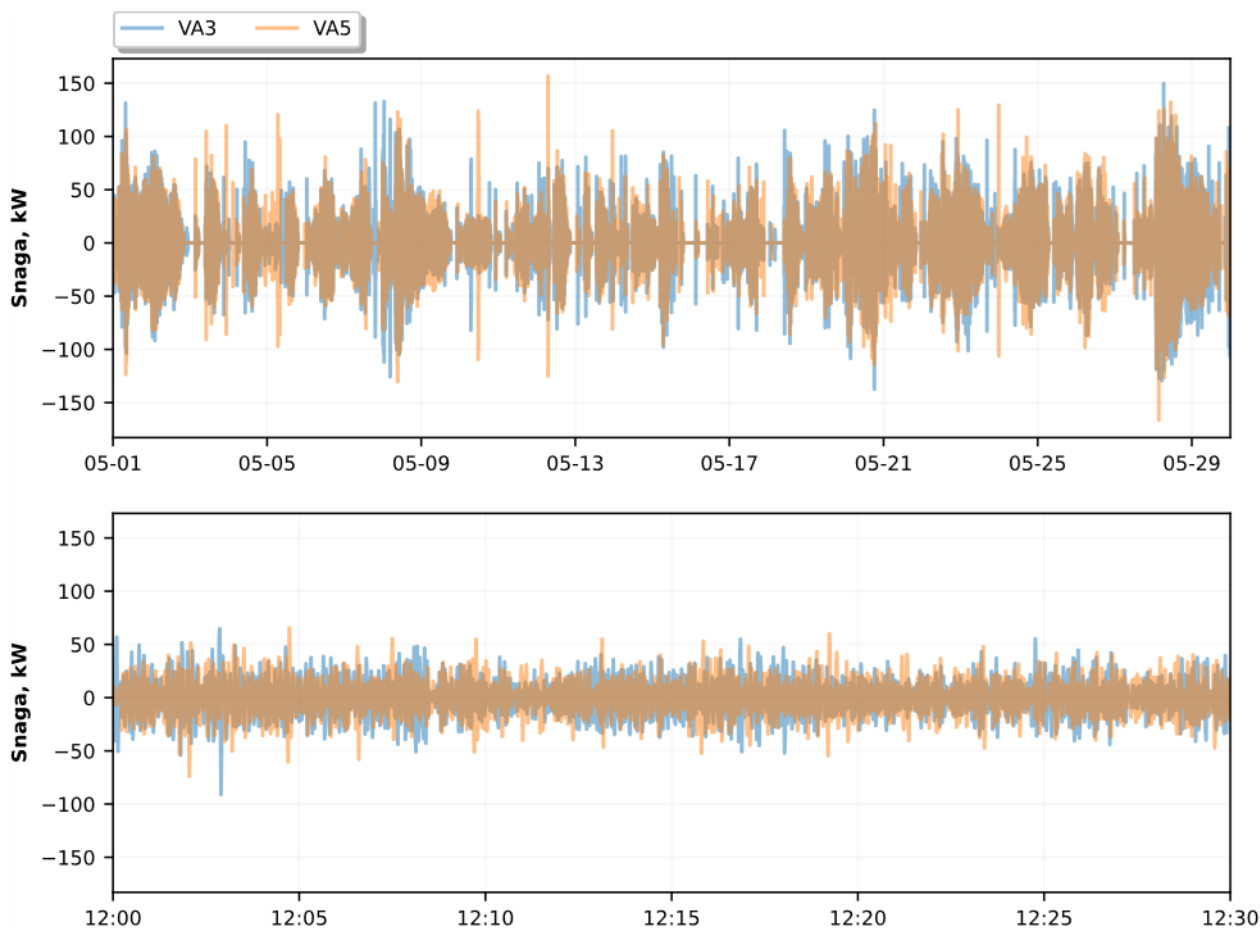
Slika 5-25 Usporedba detaljnih koeficijenata MODWT MRA transformacije zbirne proizvodnje osam VA i modela VE dobivenog predloženim skaliranjem proizvodnje VA

Moguće je primijetiti da se fluktuacije snage pri različitim vremenskim skalama relativno dobro poklapaju, ali da je preciznost nešto lošija kod viših frekvencija odnosno koeficijenata D1 – D5. Dok ovakav pristup uspijeva vjerno reproducirati varijancu (standardnu devijaciju) na pripadajućim vremenskim skalama, amplituda detaljnih koeficijenata kod viših frekvencija nije precizno reproducirana. Stoga je u nastavku predložen drugačiji pristup za područje viših frekvencija.

5.4.3 Metoda surogata vremenskih serija za visoke frekvencije fluktuacija

S ciljem boljeg razumijevanja fluktuacija proizvodnje VA u području viših frekvencija, razmatran je detaljni koeficijent D2 dvaju VA. Prikaz drugog detaljnog koeficijenta VA tijekom jednomjesečnog perioda i u odabranom 15 min intervalu prikazan je na slici 5-26 u nastavku. Usporedbom vremenske serije koeficijenta D2 dvaju VA uočljivo je da se područja s višim i nižim varijacijama općenito dobro poklapaju. Međutim, promatrajući na kraćim periodima, vremenske serije su nekorelirane, tj. nema preklapanja između kratkotrajnih skokova/padova u proizvodnji.

Moguće je zaključiti da su visokofrekvencije fluktuacije proizvodnje VA lokalno dekokorelirane, ali da postoji dobro poklapanje dugoročnih trendova u varijacijama proizvodnje. Navedena svojstva vremenskih serija proizvodnje VA u području viših frekvencija moguće je iskoristiti kako bi se generirala umjetna vremenska serija.



Slika 5-26 Usporedba drugog detaljnog koeficijenta (D2) MODWT MRA za dva različita VA u VE

Primijenjen je pristup zasnovan na tzv. metodi *small shuffle surrogate* (u nastavku: SSS metoda) prema radu [129] koja potječe iz teorije surogata vremenskih serija [130]. Izvorni cilj ove metode je ispitati

svojstva dinamičkog sustava kada jednadžbe koje opisuju taj sustav nisu poznate. SSS metoda vrši lokalno premještanje redosljeda indeksa vremenske serije, za razliku od (uobičajenog) nasumičnog premještanja vremenske serije (engl. *random shuffle*) kod kojeg se gubi informacija o autokorelaciji.

Uzimajući da je $x(t)$ razmatrana vremenska serija, $i(t)$ indeks vremenske serije $x(t)$, a $g(t)$ nasumični broj uzorkovan iz Gaussove razdiobe, SSS metoda se može opisati pomoću sljedećih koraka [129]:

- Korak 1) Izračunati $i'(t) = i(t) + Ag(t)$, gdje je A proizvoljno odabrana amplituda.
- Korak 2) Sortirati $i'(t)$ primjenom rangiranja, tj. danu sekvencu brojeva zamijeniti s njihovom veličinom u nizu (npr. sortirana sekvenca brojeva 1,7, 1,5, 1,3 i 2,1 po rangu bi bila 3, 2, 1, 4). Neka je indeks od $i'(t)$ naznačen $i''(t)$.
- Korak 3) Izračunati surogat vremenske serije $s(t) = x(i''(t))$ (izmijeniti strukturu originalnog niza s izmijenjenim indeksom $i''(t)$)

U odnosu na primijenjeni postupak prema [129], u nastavku je predmetna metoda prilagođena na način da se u koraku 2) umjesto rangiranja $i'(t)$ primijeni sortiranje. Nadalje, u koraku 1) član $Ag(t)$ je dobiven uzorkovanjem iz Gaussove distribucije sa $\mu=0$ i $\sigma=A$, a u drugom koraku je zaokružen na najbliži cijeli broj.

Potrebno je napomenuti da indeks $i'(t)$ mora biti prirodni broj unutar granica $i'(t) \in [1, \max\{i(t)\}]$. Uzorkovanjem iz Gaussove distribucije na početku i kraju indeksa vrijednost $i'(t) = i(t) + Ag(t)$ može biti izvan prethodnih granica, stoga je potrebno korigirati $i'(t)$ na način da se vrati unutar granica. Korekcija je provedena na način da sve vrijednosti $i'(t)$ koje prelaze granice zamjene s originalnim indeksom, tj. $i'(t) = i(t)$ za vrijednosti $i'(t) \notin [1, \max\{i(t)\}]$.

Grafička ilustracija korištene metode je prikazana u nastavku. Za potrebne ilustracije, odabrano je prvih 250 vrijednosti vremenskog niza detaljnog koeficijenta D1, a za amplitudu parametra A odabrane su vrijednosti $A=10$ i $A=50$. Neka je $x(t)$ vremenski niz prvih 250 vrijednosti detaljnog koeficijenta $x(t)$, i neka je $i(t)$ indeks od $x(t)$. Prema prethodnom pojašnjenju, surogat indeksa $i(t)$ dobiva se na sljedeći način:

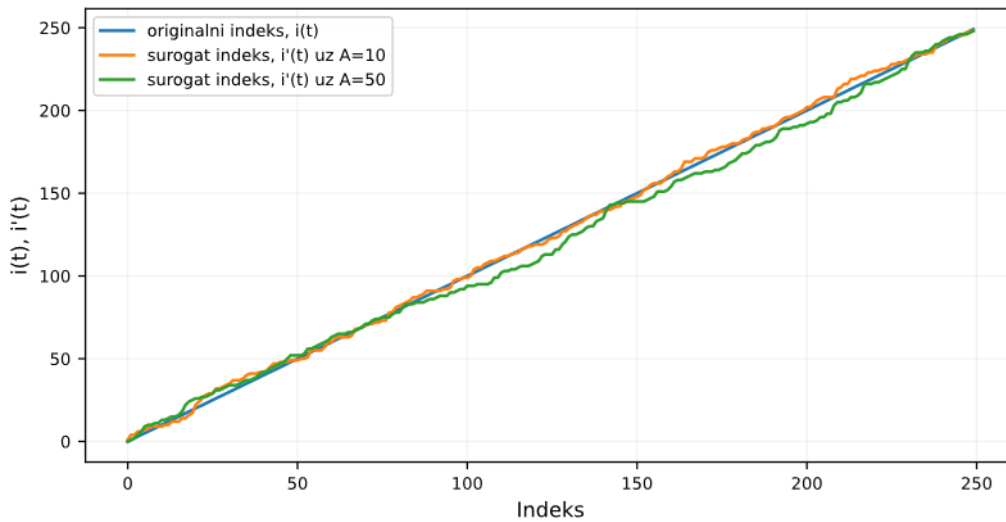
$$i'(t) = i(t) + [N(\mu = 0, \sigma = A)(t)] \quad (5.15)$$

gdje su:

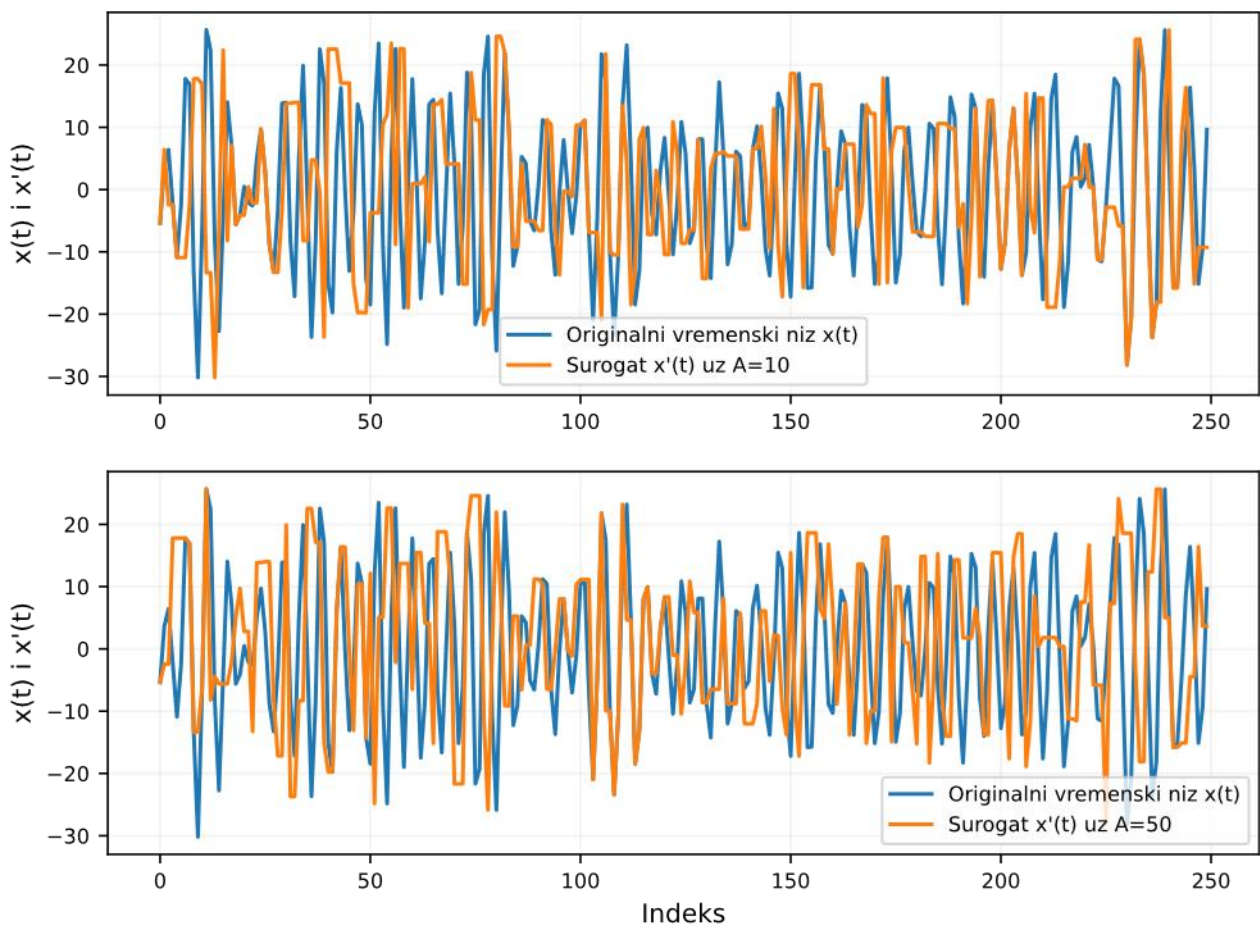
$[\cdot]$ operator zaokruživanja prema nuli,

$N(\mu = 0, \sigma = A)$ Gaussova distribucija sa srednjom vrijednosti 0 i standardnom devijacijom A .

Slika 5-27 prikazuje surogat indeksa $i'(t)$ s obzirom na parametre A . Parametar A definira koliko je širina pri kojoj će se izmiješati vremenska serija $x'(t)$, odnosno definira lokalnost izmijenjene strukture. Veći iznos faktora uzorkovat će veću promjenu vremenske serije, što je vidljivo i na slikama u nastavku.



Slika 5-27 Indeks $i(t)$ i surogat indeks $i'(t)$ s obzirom na parametar A



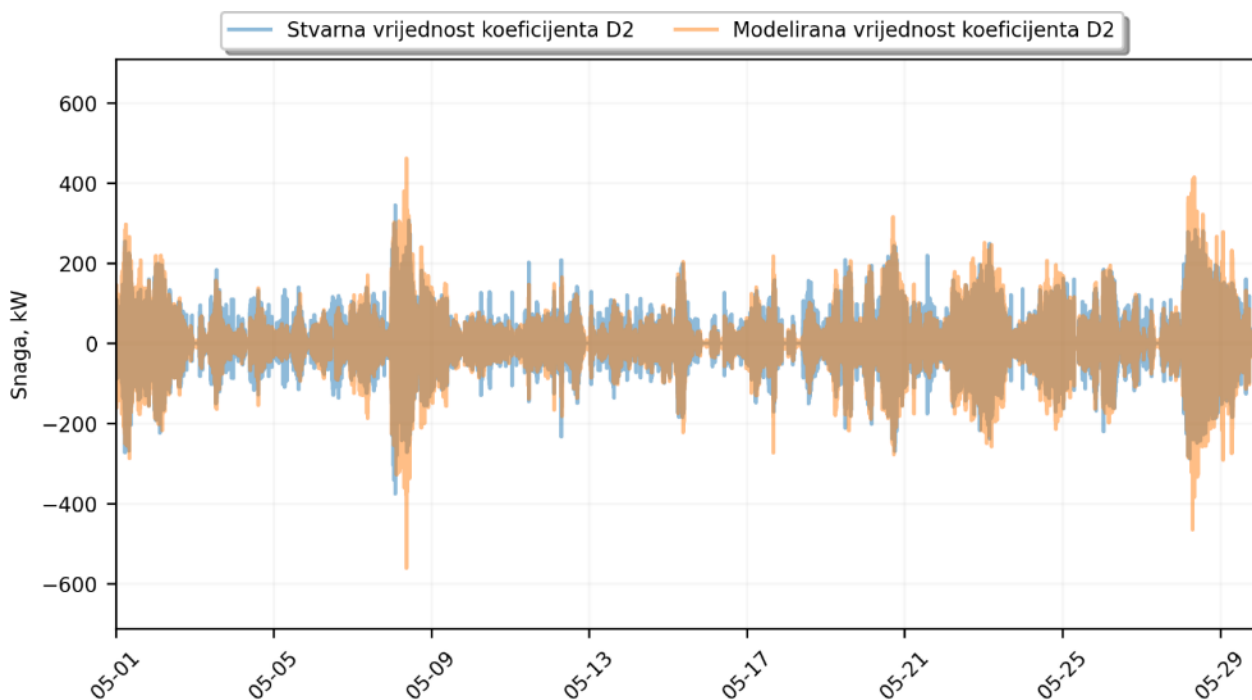
Slika 5-28 Originalna vremenska serija $x(t)$ i dva generirana surogata $x'(t)$ za $A=10$ (gore) i $A=50$ (dolje)

Tako definirana metoda surogata se može primijeniti na problematiku generiranja višestrukih realizacija detaljnih koeficijenata MODWT MRA (D_1, D_2, \dots, D_{J_0}), odnosno vjerno reproducirati detaljne koeficijente proizvodnje VA na način da su zadržana statistička svojstva fluktuacija. Cilj je dobiti odgovarajući broj realizacija vremenske serije proizvodnje VA, na način da su vremenske serije lokalno dekokorelirane, ali zadržavaju dugoročne trendove (kao na primjeru sa slike 5-28).

Za potrebe modela VE, prilikom odabira parametra A potrebno je uvažiti činjenicu da nakon generiranja umjetne vremenske serije odgovarajuće vremenske skale ne smije postojati lokalna korelacija između

umjetne i originalne vremenske serije. Odabirom relativno male vrijednosti parametra A , postoji mogućnost da korelacija promatrana na kraćim periodima (npr. nekoliko sati) neće biti dovoljno poništena. Odabran je parametar $A=86400$, koji odgovara standardnoj devijaciji na vremenskom intervalu od jednog dana (3600 jednosekundnih intervala u jednom satu pomnoženo s 24 intervala u jednom danu). Napominje se da odabir druge vrijednosti parametra A jednakog reda veličine neće bitno utjecati na rezultate. U općenitom slučaju, vrijednost parametra A potrebno je prilagoditi duljini vremenske serije.

Detaljni koeficijenti ostvarene zbirne proizvodnje osam VA i proizvodnje dobivene primjenom prethodno objašnjene metode surogata vremenskih serija uz $A=86400$ prikazani su na slici 5-29.

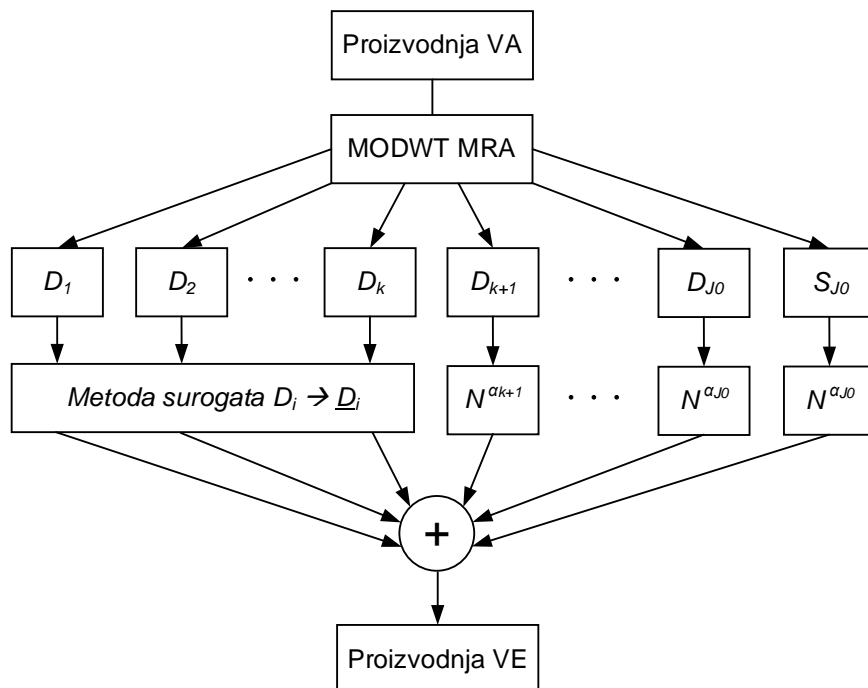


Slika 5-29 Usporedba detaljnog koeficijenta D2 zbirne proizvodnje osam VA i proizvodnje dobivene primjenom metode surogata vremenskih serija

Ako se model iz prethodnog potpoglavlja proširi s predloženom metodom surogata, na način da se u području nižih vremenskih skala (npr. prvih osam skala) primjeni metoda surogata vremenskih serija, a na preostalim skalama metoda zasnivana na eksponentima prigušenja, dobiva se model proizvodnje vjetroelektrane. Primjenom metode surogata na prvih k vremenskih skala, a metode zasnivane na eksponentima prigušenja na preostalim skalama, model proizvodnje VE može se matematički formulirati sljedećom jednadžbom:

$$P_t^{VE} = S_{t,J_0}^{VA} \cdot N^{\alpha_{J_0}} + \sum_{j=1}^k \underline{D}_{j,t}^{VA} + \sum_{j=k+1}^{J_0} D_{j,t}^{VA} \cdot N^{\alpha_j} \quad (5.16)$$

gdje su $\underline{D}_{j,t}^{VA}, j=1, 2, \dots, k$ detaljni koeficijenti dobiveni primjenom metode surogata vremenskih serija. Slika 5-30 prikazuje model grafičkim dijagramom.



Slika 5-30 Metoda skaliranja proizvodnje VA na proizvodnju VE primjenom MODWT MRA i surogata vremenskih serija

5.4.4 Ispitivanje predloženog modela vjetroelektrane

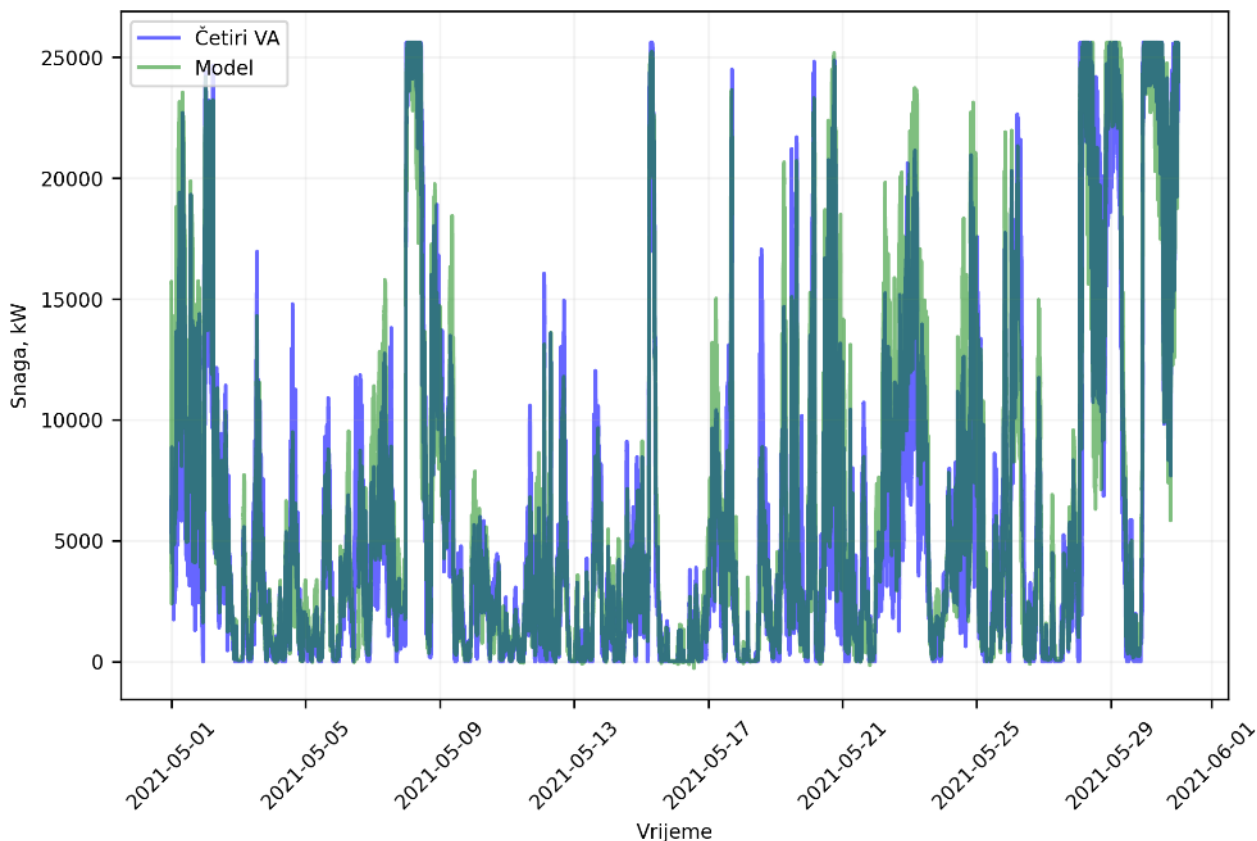
U prethodnim potpoglavljima opisan je model VE koji će se u nastavku ispitati i usporediti s ostvarenom proizvodnjom VE na način da se odabere reprezentativna skupina VA u VE (odabrani VA nisu u periodu održavanja ili izvan pogona zbog kvara).

5.4.4.1 Vremenska domena

Ispitivanje u vremenskoj domeni provedeno je direktnom usporedbom vremenskih serija tijekom odgovarajućeg perioda te usporedbom fluktuacija snage. Na slici 5-31 prikazana je usporedba ostvarene zbirne proizvodnje četiri odabrana VA nazivne snage 3200 kW i proizvodnje dobivene predloženim modelom iz prethodnih potpoglavlja. Odabran je jedan od četiri VA u odnosu na koji je napravljena usporedba. Predloženi model je formiran na način da je metoda surogata vremenskih serija primijenjena na prvih $k=9$ vremenskih skala, uz parametar $A=86400$, te primijeni eksponenta prigušenja na preostalim vremenskim skalama. Parametar $k=9$ je odabran s obzirom da je na prvih devet skala Pearsonov koeficijent korelacije između radne snage VA jednak nuli ili relativno nizak (npr. $<0,4$). Budući da je proizvodnja VA na tim skalama (period fluktuacija do $2^{10}=1024$ s) nekorelirana, model zasnovan na metodi surogata vremenskih serija bolje opisuje realno ponašanje fluktuacija snage VA.

Na temelju usporedbe ostvarene proizvodnje i primijenjenog modela VE na slici 5-31, uočljivo je da se u pojedinim periodima mogu očekivati veća odstupanja. Najveća odstupanja je moguće očekivati tijekom perioda s jakim vjetrovima kada može doći do gašenja VA, budući da brzina vjetra premašuje maksimalnu dozvoljenu brzinu vjetra pri kojoj mogu nastupiti veća mehanička opterećenja. U tim periodima, zbog različitosti brzine vjetra između VA, može se općenito očekivati ispad pojedinih, ali ne i svih VA. Takve

efekte predloženi model ne može uvažiti. Iste je moguće uvažiti primjenom stohastičkog modela raspoloživosti VA u VE.



Slika 5-31 Usporedba ostvarene proizvodnje četiri VA nazivne snage 3200 kW i proizvodnja dobivena predloženim modelom

Procjena točnosti predloženog modela nije jednostavna zbog operativnih specifičnosti, neraspoloživosti podataka, te složenog terena na kojem je VE smještena (općenito se očekuje veća razlika između proizvodnih profila VA). Jasno je da takve specifičnosti mogu penalizirati preciznost korištene metode, iako njihov utjecaj neće uzorkovati značajniju promjenu na kasniju analizu odbačene proizvodnje na duljim razmatranim periodima. Dakle, primjena standardnih metrika za utvrđivanje preciznosti poput srednje apsolutne pogreške (MAE, engl. *mean absolute error*), srednje kvadratne pogreške (MSE, *mean squared error*) ili druge izvedene metrike neće pružiti jasnu sliku točnosti modela, budući da će ovisiti o prethodno navedenim operativnim specifičnostima te odabranom reprezentativnom VA i odabranim VA u VE u odnosu na koje se model uspoređuje.

Svojstva predloženog modela proizvodnje VE u vremenskoj domeni su uspoređena s ostvarenom proizvodnjom i tzv. pojednostavljenim modelom kao referentnom alternativom. Kod pojednostavljenog modela primjenjuje se jednoliko skaliranje radne snage u cijelom frekvencijskom spektru, odnosno proizvodnja VE se dobiva množenjem proizvodnje VA s brojem VA u VE. Kao što je navedeno u prethodnim poglavljima, takav pristup neće rezultirati točnijom procjenom fluktuacija snage u području viših frekvencija (zanemaruje se efekt poravnanja u VE).

Kao metrika za usporedbu fluktuacija predloženog modela u odnosu na ostvarenu proizvodnju i pojednostavljeni model koristi se iznos fluktuacije snage δ_t^{VE} . Ona se definira kao apsolutna razlika između

proizvodnje VE u vremenskom trenutku t i $t + \Delta t$, normalizirana s instaliranom snagom VE (umnožak nazivne snage VA i broja VA):

$$\delta_t^{VE} = \left| \frac{P_{t+\Delta t}^{VE} - P_t^{VE}}{N \cdot P_n^{VA}} \right|, \quad \forall t \in T \quad (5.17)$$

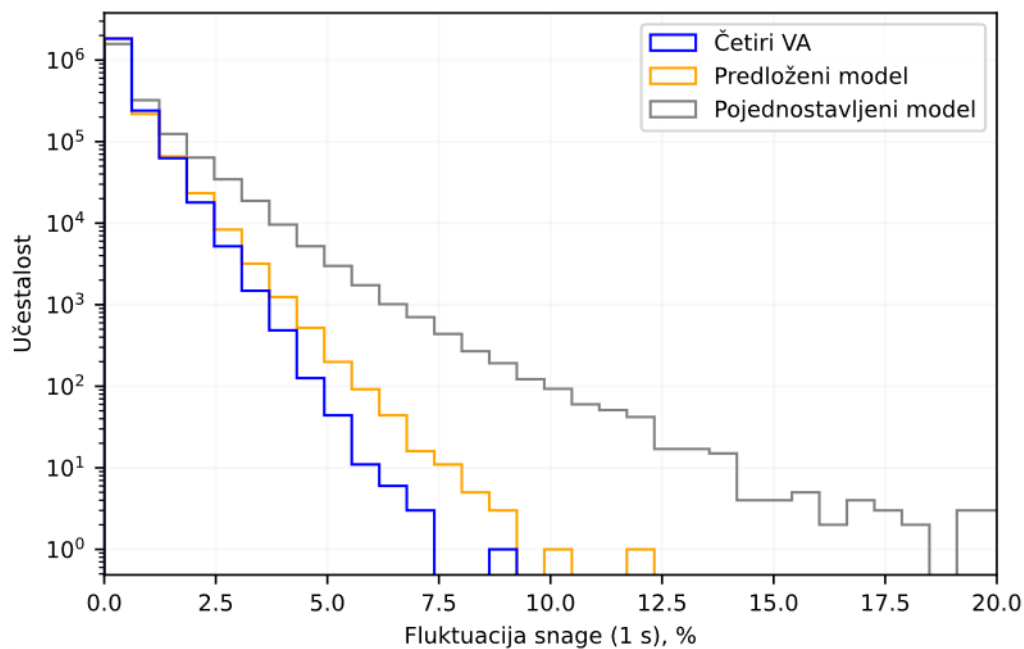
gdje su:

$P_t^{VE}, P_{t+\Delta t}^{VE}$ radna snaga VE (ostvarena ili dobivena modelom) u vremenskim trenucima t i $t + \Delta t$, respektivno,

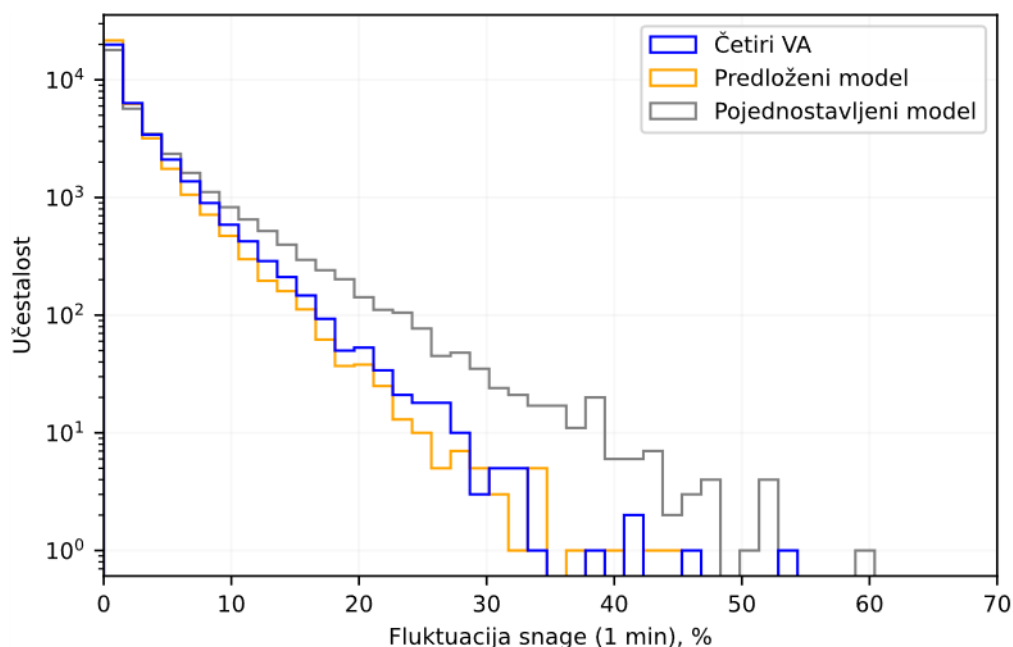
P_n^{VA} nazivna snaga VA.

Tako definirani iznosa fluktuacija snage δ_t^{VE} analiziran je za vremenske rezolucije $\Delta t=1$ s i $\Delta t=1$ min. Slika 5-32 prikazuje histogram postotnog iznosa fluktuacija zbirne proizvodnje četiri VA dobivene ostvarenom proizvodnjom (plavo), predloženim modelom (žuto) i pojednostavljenim modelom (sivo) za (a) 1 sekundnu rezoluciju i (b) 1 minutnu rezoluciju proizvedene snage. Uočava se da pojednostavljeni model ima značajno odstupanje fluktuacija snage u odnosu na ostvarenu proizvodnju kod primijene 1 s i 1 min rezolucije, što potvrđuje hipotezu da su fluktuacije snage u području viših frekvencija značajno izraženije ako se ne uvaži efekt poravnanja. Budući da predloženi model uvažava efekt poravnanja, poklapanje između predloženog modela i ostvarene proizvodnje je značajno poboljšano kod 1 s i 1 min vremenske rezolucije.

Ovdje se ističe da je detaljnija usporedba preciznosti spomenutih modela i ostvarene proizvodnje provedena u potpoglavlju 6.2.2, gdje se razmatra odbačena proizvodnja pri različitim vremenskim rezolucijama dobivena primjenom modela (predloženog i pojednostavljenog) i stvarne proizvodnje VA.



(a)



(b)

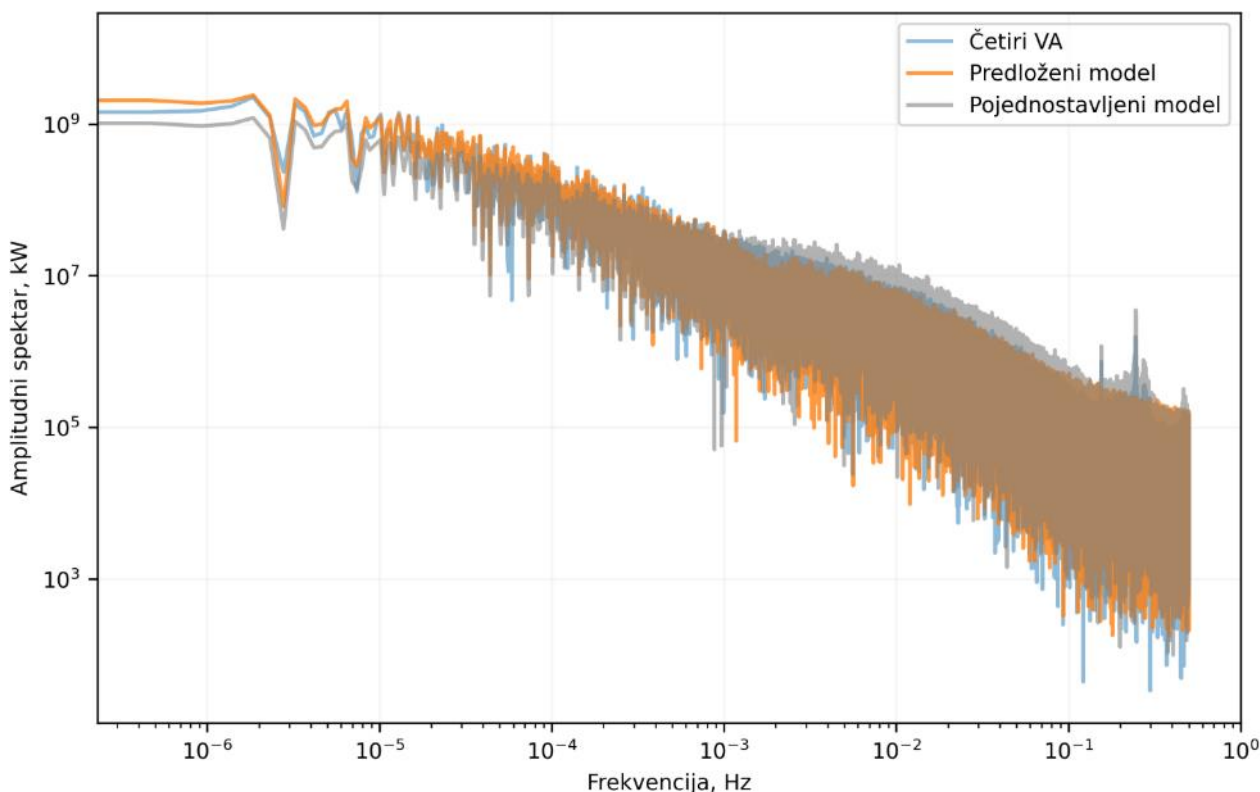
Slika 5-32 Empirijski histogram postotnog iznosa fluktuacija zbirne proizvodnje četiri VA za svibanj 2021. za ostvarenu proizvodnju, predloženi model i pojednostavljeni model. Fluktuacije su izražene u (a) 1 sekundnoj i (b) 1 minutnoj rezoluciji

5.4.4.2 Frekvencijska domena

U frekvencijskoj domeni, fluktuacije proizvodnje VE analizirane su primjenom FT-a, odnosno amplitudnog spektra FT-a. Usporedba amplitudnog spektra između ostvarene proizvodnje i modela prikazana je na slici 5-33. Primjetno je da pri frekvencijskom rasponu između cca 10^{-3} Hz (period fluktuacija 1000 s, odnosno cca 16,67 min) i 10^{-1} Hz (period fluktuacija 10 s) amplituda fluktuacija pojednostavljenog modela postiže veće iznose u odnosu na ostvarenu proizvodnju. Navedeni efekt nije primijećen kod predloženog modela

VE. Povećanje amplitude fluktuacija u danom periodu može se pridijeliti zanemarenju efekta poravnanja kod pojednostavljenog modela.

Potrebno je naglasiti da se u području viših frekvencija, između 0,1 Hz i 0,3 Hz u amplitudnom spektru karakteristično javljaju dva povišenja amplitude koja su posljedica frekvencije prolaska lopatica [122]. Kod predloženog modela povišenja u spektru povišenja nisu prisutna budući da se generiraju umjetne vremenske serije koje ne zahvaćaju predmetne efekte, a isti nisu važni i nemaju utjecaja na daljnju analizu odbačene proizvodnje.



Slika 5-33 Amplitudni spektar dobiven Fourierovom transformacijom ostvarene proizvodnje četiri VA, predloženog i pojednostavljenog modela

5.4.5 Ograničenja predloženog modela vjetroelektrane

Predloženi model vjetroelektrane polazi od proizvodnje jednog VA iz čega se poznavanjem karakteristika prigušenja pomoću eksponenata prigušenja dolazi do modelirane proizvodnje VE. Činjenica da model polazi od proizvodnje VA, a ne direktno od karakteristika vjetra (npr. brzine i smjera vjetra) motiviran je primarno kompleksnom dinamikom VA. Iako se korištenjem stvarne proizvodnje VA izbjegava pogreška i nesigurnost u procjeni proizvodnje VA na temelju brzine vjetra, ovakav pristup ograničava generalizaciju modela VE odnosno njegovu širu namjenu. Prema postojećoj formi modela, njegova primjena je ograničena na lokacije na kojoj je već poznata proizvodnja samih VA, budući da se eksponenti prigušenja izvedu direktno iz vremenske serije proizvodnje VA. U ovom kontekstu, primarni cilj modela VE je omogućiti uvid u odbačenu proizvodnju, odnosno razlike u odbačenoj proizvodnji pri većem broja VA.

Polaženje od proizvodnje jednog VA također otvara problematiku odabira „reprezentativnog“ VA, tj. VA koji će se koristiti kao podloga za dobivanje modela VE. Reprezentativan VA ne smije biti izvan pogona u promatranom periodu, budući da će izvedeni model VE također biti izvan pogona. Također, bilo kakve

operativne specifičnosti koje se mogu javiti u pogonu na predmetnom VA biti će značajnije prenesene na kompletnu VE (npr. isključenje VE pri visokim brzinama vjetra, zaleđivanje lopatica, i sl.). Pri pojavi potonjih specifičnosti predloženi model VE će imati značajnija odstupanja u odnosu na ostvarenu proizvodnju, kod koje su takve specifičnosti najčešće izolirane na jedan VA u datom diskretnom vremenskom intervalu. U pogledu problematike odabira reprezentativnog VA, odnosno modeliranja operativnih specifičnosti, moguće je uvesti unaprjeđenja i poboljšati model kroz nekoliko stavaka:

- Problem odabira reprezentativnog VA može se izbjeći ako se umjesto odabira jednog VA nasumično odabere VA iz skupine dostupnih VA, a zatim se iz odabranog VA generira višestruka realizacija proizvodnje (jednog ili više VA). Postupak se ponavlja u mjeri dok se ne postigne željena instalirana snaga. Generirane realizacije proizvodnje VA mogu se također nadodati na ostvarenu proizvodnju VE čime se smanjuje utjecaj pogreške modela na rezultate.
- Operativne specifičnosti poput gašenja VA tijekom većih brzina vjetra ili leđenja lopatica moguće je uzeti u obzir stohastičkim modelima koji se mogu realizirati na temelju postojeće statistike i mjerenja.

Potrebno je također naglasiti i problematiku modeliranja zavjetrinskih gubitaka koji čine dominantni udio ukupnih gubitaka u VE. U ovom pogledu, budući da su korištene vrijednosti ostvarene proizvodnje VA, zavjetrinski gubici su već uračunati u proizvodnji. Međutim, zavjetrinski gubici se mogu značajnije razlikovati između pojedinih VA u VE, zbog čega je pri odabiru reprezentativnog VA potrebno uzeti u obzir i da se odabere VA koji ima prosječne zavjetrinske gubitke, što je moguće uočiti iz prosječne proizvodnje VA na duljim vremenskim periodima. Generiranjem višestrukih realizacija reprezentativnog VA zapravo se reproduciraju zavjetrinski gubici u jednakoj mjeri na svaki sljedeći VA dobiven modelom, zbog čega može doći do pojačanja zavjetrinskih gubitaka u slučaju odabira manje reprezentativnog VA. Navedeni problem može se znatno reducirati ako se postupi na način da se umjesto jednog reprezentativnog VA kao osnovna za modeliranje koristi više nasumično odabiranih VA, kako je prethodno pojašnjeno.

U konačnici, ključno je razmotriti kolika je preciznost predloženog modela VE pri izračunu odbačene proizvodnje. Navedenu preciznost moguće je jedino procijeniti usporedbom odbačene proizvodnje korištenjem predloženog modela VE i ostvarene proizvodnje VE u istim uvjetima. Takva usporedba napravljena je u potpoglavlju 6.2.2.

5.5 Model proizvodnje sunčane elektrane kod visokih vremenskih rezolucija

Pri pretvorbi komponenti sunčevog zračenja mjerenih u visokim rezolucijama u proizvodnju SE, nailazi se na sličan problem kao i kod VE. Naime, direktna pretvorba sunčevog zračenja u snagu nije održiva jer takav pristup ne uvažava prigušenje fluktuacija zračenja u proizvodnji SE.

Tipičan slijed proračuna proizvodnje SE iz komponenti sunčevog zračenja i ostalih meteoroloških podataka sastoji se od sljedećih koraka:

- preuzimanje podataka sunčevog zračenja (najčešće komponenti GHI i DHI), temperature zraka i brzine vjetra na lokaciji SE,
- pretvorbe GHI i DHI komponenti zračenja (horizontalne komponente) u ukupno zračenje pod kutem na kojem se planiraju zakrenuti FN moduli, tj. POA zračenje (ako se radi o fiksnoj konstrukciji),

- računanje gubitaka prije pretvorbe u FN modulima, koje se sastoji od udaljenih zasjenjenja (horizonta) i bliskih zasjenjenja (međusobno zasjenjenje susjednih redova FN modula, zasjenjenje od objekata), te gubitaka zbog refleksije primarno u staklenom sloju modula i nečistoća,
- pretvorbe efektivnog zračenja (POA umanjeno za gore navedene gubitke) u proizvedenu snagu FN modula, koji ovisi o efikasnosti FN modula i ukupnoj površini koju prekrivaju FN moduli,
- računanje gubitaka nakon pretvorbe u FN modula, tj. temperaturne gubitke, gubitke zbog starenja FN modula, DC gubitke (ožičenje), gubitke u izmjenjivačima, AC gubitke, neraspoloživost itd., i
- izračun proizvedene snage na pragu mreže, na način da se od bruto proizvedene snage FN modula odbiju svi gubici nakon pretvorbe.

Dok se prethodno opisani postupak primjenjuje za modeliranje proizvodnje SE neovisno o korištenoj vremenskoj rezoluciji, ključan korak kod kojeg dolazi do razlike pri primijeni visokih i niskih vremenskih rezolucija je pretvorba efektivnog zračenja u ukupnu proizvedenu snagu FN modula. Većina komercijalnih ili otvorenih programskih paketa je temeljena na pretpostavci koja nije održiva kod primjene visokih vremenskih rezolucija. Naime, ukupna proizvedena snaga FN modula izražava se preko efektivnog sunčevog zračenja primjenom sljedeće formulacije:

$$P_{FN,t} = N_{FN} \cdot \eta_{FN} \cdot S \cdot I_{ef,t} \quad (5.18)$$

gdje su:

- N_{FN} ukupan broj FN modula u SE,
 η efikasnost FN modula,
 S ukupna površina FN modula,
 $I_{ef,t}$ efektivno zračenje pod kutem FN modula.

Dakle, pretpostavlja se da će proizvodnja FN modula biti linearno proporcionalna efektivnom sunčevom zračenju FN modula u cijelom frekvencijskom rasponu, neovisno o veličini elektrane ili drugim specifičnostima. Međutim, zbog kompleksne dinamike odziva SE na promjene sunčevog zračenja prethodna formulacija nije primjenjiva kod visokih vremenskih rezolucija, budući da će rezultirati izraženijim fluktuacijama proizvodnje, kao što je slučaj i za VE pri zanemarivanju efekta poravnjanja. Analogno kao i kod VE, pogreške će biti izraženije što je veća instalirana snaga SE, odnosno površina koju prekrivaju FN moduli.

Vjerojatno iz istog razloga neki od komercijalnih programskih paketa (npr. PVSyst) ograničavaju rad na satnu rezoluciju jer efekti prigušenja fluktuacija u proizvodnji nisu značajno izraženi pri nižim rezolucijama pa je klasični pristup, odnosno pretpostavka linearnosti proizvedene snage SE i sunčevog zračenja održiva.

5.5.1 Postojeći modeli

Problematika modeliranja SE kod primijene visoke razlučivosti komponenti sunčevog zračenja nije detaljno obrađena. Postojeći model SE prikladni za korištenje pri visokim vremenskim rezolucijama su razvijeni u radovima [48], [49], [54], a isti su detaljnije obrađeni u nastavku.

5.5.1.1 Model SE kao niskopropusni filter prvog reda

Marcos i dr. [48] su prvi predložili model SE u kojem se elektrana modelira kao niskopropusni filter prvog reda sunčevog zračenja. Rad je temeljen na istraživanju fluktuacija snage šest operativnih VE u Španjolskoj, instalirane snaga u rasponu 1,0 – 9,5 MWp [47].

Na svakoj od lokacija SE, mjerena je izlazna radna snaga i sunčevo zračenje pod kutem modula (POA zračenje) u 1 s rezoluciji tijekom perioda od jedne godine. Autori su došli do sljedećih važnijih spoznaja:

- analizom amplitudnog spektra zračenja i izlazne snage SE, pokazano je da se spektar može približno opisati funkcijom $f^{-0,7}$ u području nižih, te funkcijom $f^{-1,7}$ u području viših frekvencija,
- točka u kojoj se dvije funkcije sijeku odgovara graničnoj frekvenciji f_c , a ista se na temelju rezultata istraživanja može izraziti preko površine SE kao $f_c \sim S_{SE}^{-0,5}$

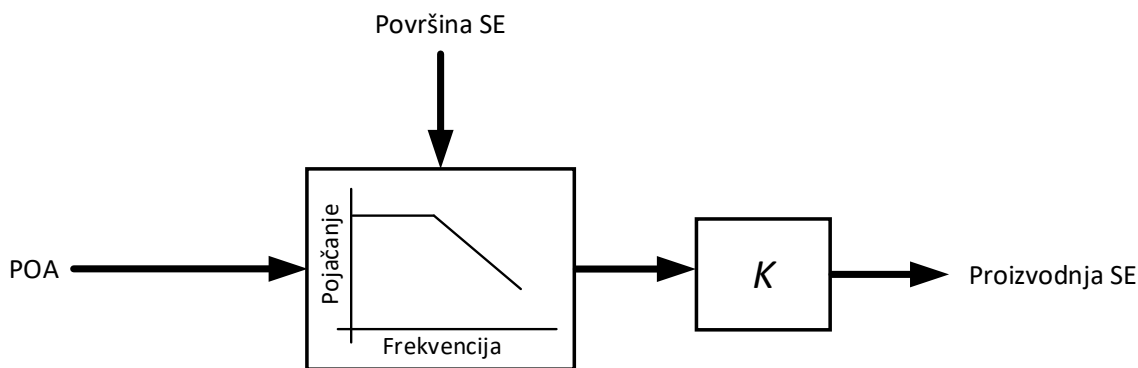
Konstanta proporcionalnosti između granične frekvencije i površine SE je dobivena interpolacijskom funkcijom korištenjem metode najmanjih kvadrata odstupanja. Na temelju spoznaja iz istraživanja, predložen je hipotetski niskopropusni filter prvog reda opisan sljedećom prijenosnom funkcijom [48]:

$$H(s) = \frac{K}{\frac{\sqrt{S_{SE}}}{2\pi \cdot 0,02} s + 1} \quad (5.19)$$

gdje su:

K omjer nazivne snage energetskog transformatora i referentne ozračenosti 1000 W/m²,

$s = j\omega$ kompleksna varijabla.



Slika 5-34 Model SE kao niskopropusni filter prvog reda za sunčevo zračenje (zasnovano na [48])

Proizvodnja SE dobiva se primjenom inverzne Laplaceove transformacije umnoška prijenosne funkcije prema (5.19) i ukupnog zračenja pod kutem FN modula u frekvencijskoj domeni.

Glavno ograničenje korištenog modela se zasniva na hipotezi da je proizvedena snaga SE ovisna samo o površini SE, dok se zanemaruju preostali utjecajni faktori poput prostorne konfiguracije FN modula i lokalnih klimatskih uvjeta.

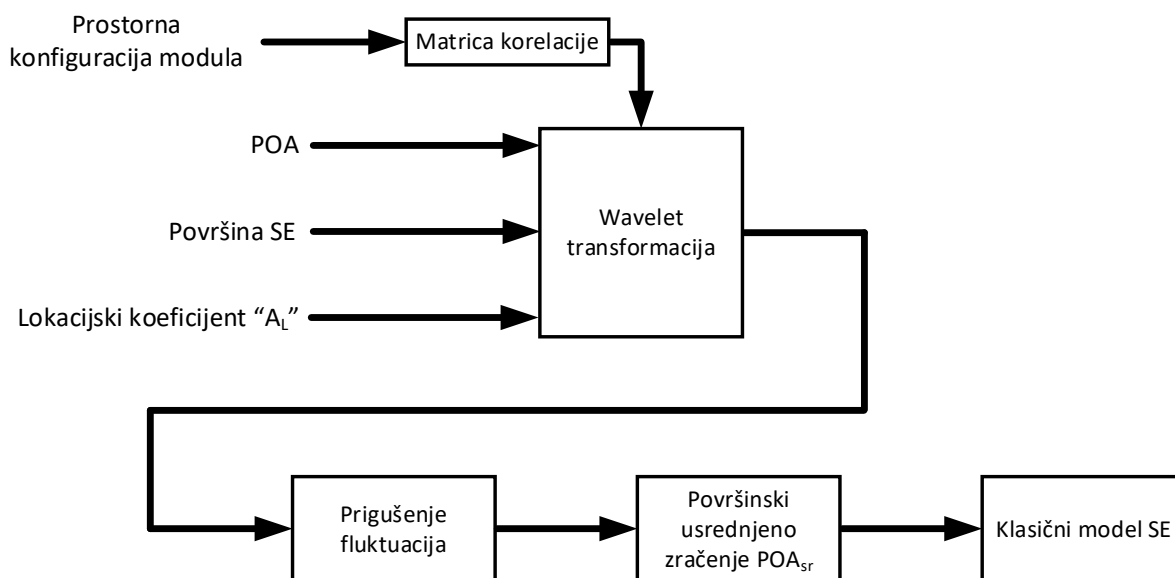
5.5.1.2 WVM model

Lave i dr. [49] su predložili tzv. *wavelet variability model* (WVM) s kojim se mjerenja sunčevog zračenja s točkastog senzora (piranometra) u visokim vremenskim rezolucijama mogu pretvoriti u proizvodnju SE na način da se točkasto mjerenje površinski usrednji te koristi kao ulazni parametar u klasični model SE.

Metoda proračuna proizvodnje SE na temelju mjerenja sunčevog zračenja sastoji od sljedećih koraka:

- Formiranje matrice udaljenosti i empirijski uspostavljene formulacije koeficijenta korelacije između svih parova „lokacija“ u SE. Pojam „lokacije“ u kontekstu rada je fleksibilan i može označavati grupe FN modula, pojedinačne elektrane u slučaju distribuirane SE na odgovarajućem području ili individualne FN module, uz naglasak da koeficijent korelacije između susjednih „lokacija“ mora biti približno jednak 1 da se ostvari fina rezolucija.
- Primjena wavelet transformacije na vremenskoj seriji sunčevog zračenja (POA ili GHI), čime se sunčevo zračenje raščlanjuje na više vremenskih skala.
- Izračun faktora smanjenja varijacija (VR, engl. *Variability reduction*) svake vremenske skale poznavanjem matrice korelacije iz kojeg se dobiva površinski usrednjeno zračenje.
- Proračun proizvodnje SE iz površinski usrednjenog GHI-a korištenjem tipične metodologije proračuna proizvodnje SE.

Pojednostavljena shema kompletnog postupka prikazana je na slici 5-35.



Slika 5-35 WVM model SE za visoke vremenske rezolucije (zasnovano na [49])

Empirijska formulacija koeficijenta korelacije preuzeta je iz rada [131], u kojem je pokazano da koeficijent korelacije između dvije lokacije SE ovisi o udaljenosti između lokacija, vremenskoj rezoluciji i lokacijskom koeficijentu A_L koji fizikalno ima veličinu brzine, a proporcionalan je brzini kretanja oblaka:

$$\rho(d_{m,n}, \hat{t}) = e^{-\frac{1}{A_L} \cdot \frac{d_{m,n}}{\hat{t}}} \quad (5.20)$$

gdje su:

$d_{m,n}$ udaljenost između lokacija m i n ,

\hat{t} vremenska rezolucija razmatrane skale.

Faktor smanjenja fluktuacija računa se prema sljedećem izrazu [49]:

$$VR = \frac{N_s^2}{\sum_{m=1}^{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} \rho(d_{m,n}, \hat{t})} \quad (5.21)$$

gdje je N_s ukupan broj „lokacija“. Osnovni kriterij za diskretizaciju fotonaponskih modula na segmente je da između susjednih segmenata m i n korelacija bude $\rho \approx 1$. Proračunom faktora VR za pojedinu vremensku skalu dobiva se osnova za izračun površinski usrednjenog zračenja.

Parametar A_L nije konstantan i ovisi o lokaciji te o dnevnim varijacijama, a tipično poprima vrijednosti $A_L=1-3$ za obalne lokacije karakterizirane niskim, sporije kretajućim oblacima, te $A_L>4$ za kopnene lokacije s visokim i brzim oblacima [49]. U radu [49], parametar A_L je određen mrežom geografski distribuiranih piranometara. Nedostupnost podataka s više piranometara za određivanje parametra A_L u većini slučajeva ujedno je i glavno ograničenje za praktičnu upotrebu ove metode.

Isti autori su u kasnijem radu [54] unaprijedili primjenjivost WVM metode budući da su pokazali da se parametar A_L može aproksimativno procijeniti kao vrijednost koja je dvostruko manja od brzine kretanja oblaka v_{obl} :

$$A_L = \frac{1}{2} \cdot v_{obl} \quad (5.22)$$

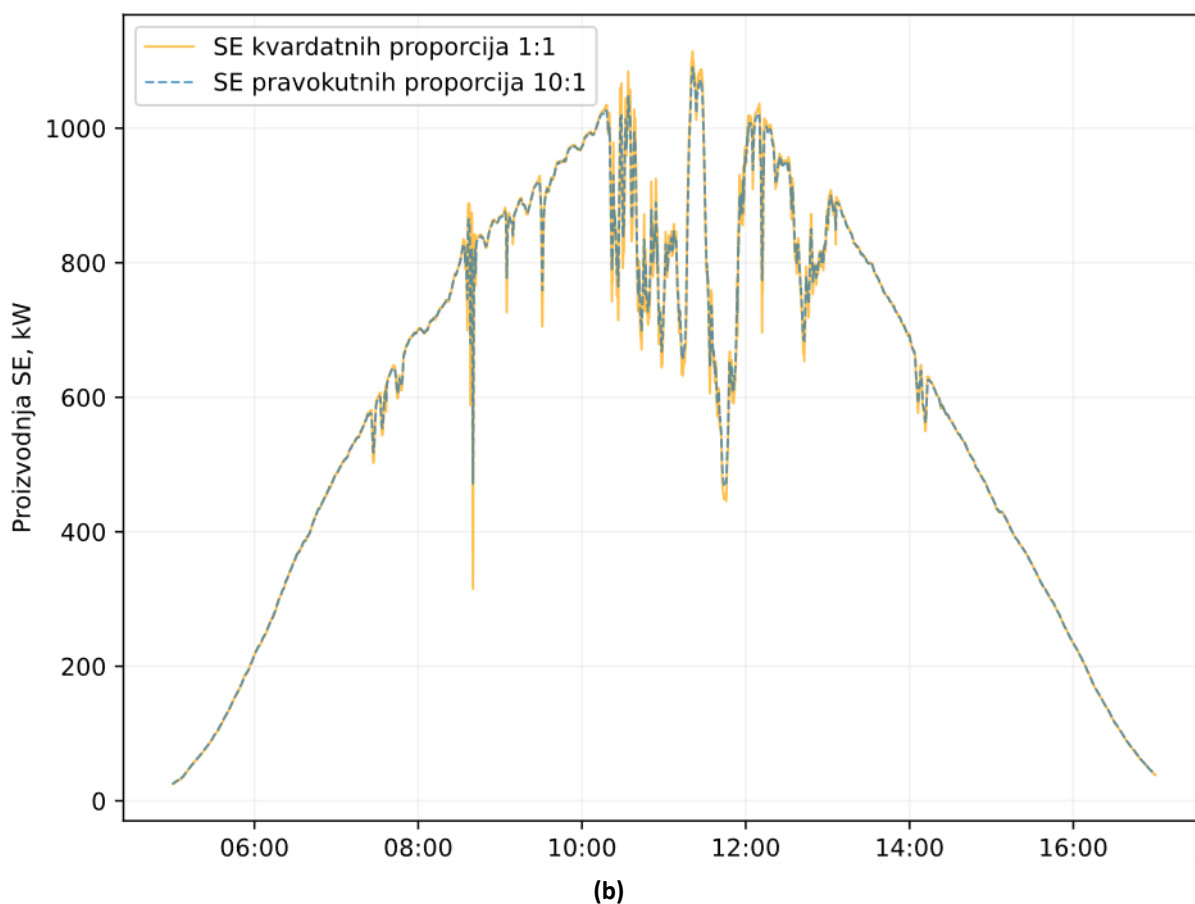
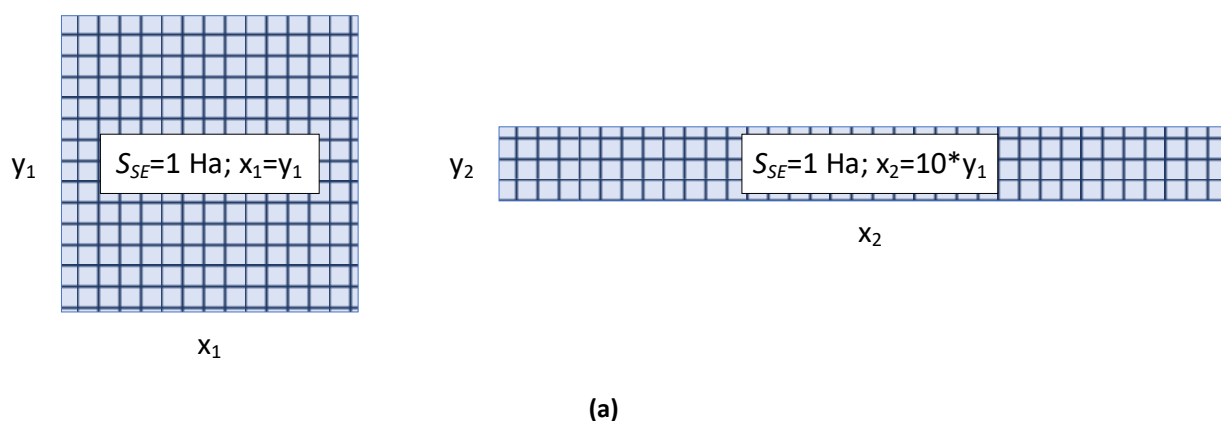
Kao što navode autori, navedena zakonitost je potvrđena kada je sunčevo zračenje mjereno na dva udaljena mjerna instrumenta u smjeru kretanja oblaka, ali ne i za druge smjerove. Razvijena metoda je provjerena u radu [90] primjenom mreže od 25 distribuiranih piranometara, a rezultati su pokazali da WVM metoda daje manje fluktuacije površinski usrednjenog zračenja u odnosu na aritmetičku sredinu GHI-a sa 25 piranometra.

5.5.1.3 Usporedba modela

Usporedbom modela za visoke vremenske rezolucije, zaključuje se da model baziran na Marcos i dr. [48] uvažava samo površinu SE kao utjecajni faktor, a zanemaruje tehničke parametre SE ili lokalne karakteristike sunčevog zračenja. Međutim, predloženi model je jednostavniji za implementaciju i računski efikasniji. Nasuprot tome, model baziran na radu Lave i dr. [49] omogućuje veću fleksibilnost i širu primjenjivost, s obzirom da je moguće modeliranje SE različitih geometrija (npr. raspršenih SE na širem geografskom području) i uzimanje u obzir karakteristika specifičnih za razmatranu lokaciju (brzine kretanja oblaka). Nedostaci predložene WVM metode su nesigurnost u procjeni parametra A_L i računska složenost koja onemogućava efikasno formiranje matrice udaljenosti fino diskretiziranih „lokacija“ za veće SE.

Korištenjem modela [48], [49], u nastavku je napravljena usporedba proračuna proizvodnje SE dviju različitih prostornih konfiguracija. Budući da je prigušenje ovisno o matrici korelacije svih parova „lokacija“, odnosno u ovom kontekstu dijelova SE, dvije SE iste površine, a različitih proporcija će imati različiti stupanj prigušenja fluktuacija. Kao primjer razmatrane su dvije SE površine jednog hektara uz pretpostavljenu gustoću FN modula 1 MWp/Ha, pri čemu je jedna elektrana kvadratnih proporcija, a druga pravokutnog oblika uz proporcije stranica 10:1. Obje elektrane su razbijene na 10000 segmenata kako bi se postigla fina razlučivost uz $\rho(d_{m,n}, \hat{t}) \approx 1$ između susjednih segmenata te je u oba slučaja izračunat faktor smanjenja fluktuacija prema jednadžbi (5.21). Ako se kao ulazni signal uvede sunčevo zračenje u 1 s

rezoluciji, na izlazu se dobiva proizvodnja SE za obje konfiguracije prema slici 5-36. Moguće je primijetiti da su fluktuacije kod SE kvadratnih proporcija više izražene u odnosu na SE pravokutnih proporcija. Navedeno je i očekivano jer su pojedini segmenti u SE duguljastih oblika više udaljeni, čime ujedno imaju i manju korelaciju.



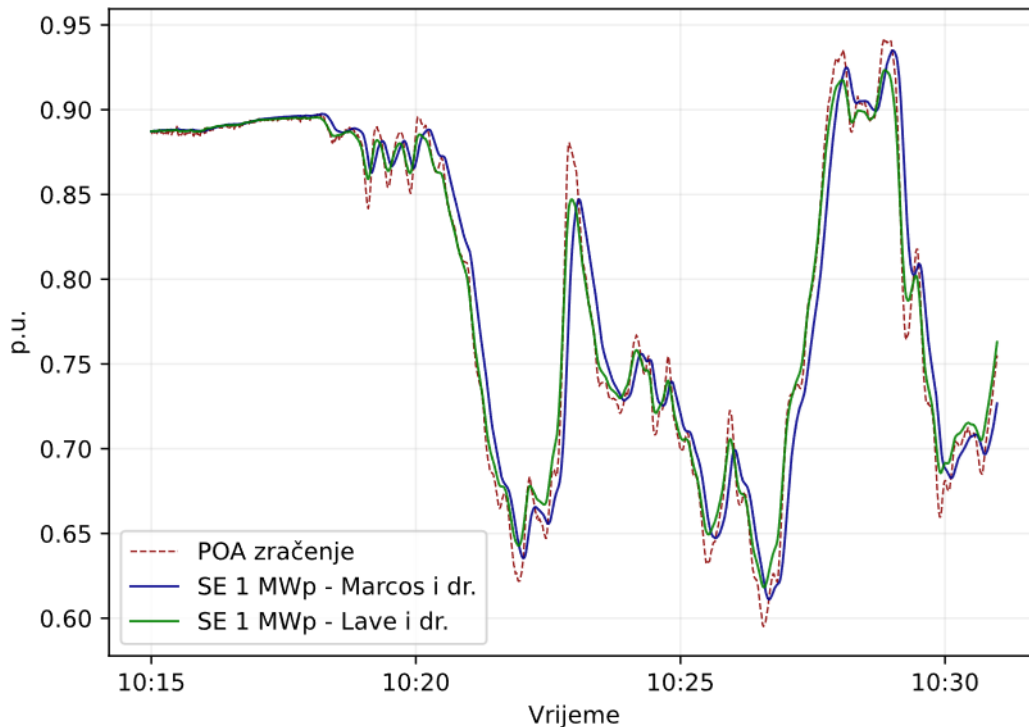
Slika 5-36 Promjene fluktuacija proizvodnje za različite prostorne konfiguracije SE (a) kvadratna konfiguracija (lijevo) i pravokutna konfiguracija uz omjer stranica 10:1 (desno) i (b) vremenska serija proizvodnje SE dobivene modelom zasnovanim na [49]

Potrebno je navesti kako je kod praktične primjene modela zasnovanog na [49] uvjet $\rho(d_{m,n}, \hat{t}) \approx 1$ teško ostvariv za velike SE (instaliranih snaga >1 MWp). U prethodnom slučaju s podjelom na 10000 segmenata uvjet je ostvaren, međutim daljnje povećanje broja segmenata računski je vrlo izazovno i zahtjeva značajne resurse. Za izračun matrice udaljenosti (bez redukcije), ukupan broj $k=2$ kombinacija od $n=10000$ segmenata bez ponavljanja iznosi:

$$C_k^n = \frac{n!}{k!(n-k)!} = \frac{10000!}{2!(10000-2)!} = 49995000 \quad (5.23)$$

Matrica udaljenosti je simetrična, zbog čega je moguće promatrati samo gornji trokut matrice, što će smanjiti broj kombinacija. Neovisno o prethodnom, za elektrane većih snaga povećanje broja segmenata nije praktično, zbog čega neće biti ostvaren uvjet $\rho(d_{m,n}, \hat{t}) \approx 1$ te će se posljedično uvesti pogreška u izračun faktora prigušenja. Zbog ovog problema primjena algoritma iznesenog u [49] nije primjenjiva na SE većih instaliranih snaga bez pojednostavljenja.

Usporedba proizvodnje SE dobivene modelima razvijenim u [48] i [49] prikazana je usporedno sa sunčevim zračenjem na slici 5-37. Usporedba je provedena korištenjem 1 s podataka sunčevog zračenja pod kutem FN modula (pretpostavljeno 20°) i uz pretpostavku SE instalirane snage 1 MWp. Tijekom prikazanog 15 min vremenskog intervala vidljivo je da proizvodnja SE manje fluktuiraju kod oba modela u odnosu na POA zračenje, što je i očekivano s obzirom na prigušenje koje se javlja kod SE većih instaliranih snaga. Također, oba modela daju slične rezultate, ali model zasnovan na radu autora Marcos i dr. [49] ima odgovarajuće kašnjenje u odnosu na POA zračenje. Kašnjenje izlaznog signala u odnosu na ulazni posljedica je primjene niskopropusnog filtra. Navedeno kašnjenje nema značajnog efekta na rezultate ukoliko se primjenjuje visoka razlučivost uzlaznog signala. Efekt kašnjenja nije prisutan kod modela [49].



Slika 5-37 Usporedba proizvodnje SE za visoke vremenske rezolucije dobivene korištenjem modela zasnovanih na [48] (plavo) i [49] (zeleno)

5.5.2 Predloženi model za SE instalirane snage >1 MWp

5.5.2.1 Općenito

Upotreba modela SE je nužna budući da podaci proizvodnje SE u visokoj vremenskoj rezoluciji nisu dostupni. U tu svrhu, predloženi model SE za visoke vremenske rezolucije omogućava pretvorbu komponenti sunčevog zračenja u proizvodnju na način da se uvažava svojstva efekta prigušenja. Kao što je

prethodno navedeno, modeli SE za niske vremenske rezolucije ne uvažavaju efekt prigušenja fluktuacija zbog utjecaja oblaka, odnosno pretpostavljaju da će proizvedena snaga SE biti linearno proporcionalna efektivnom zračenju koje upada pod kutem nagiba FN modula, neovisno o instaliranoj snazi odnosno veličini SE.

Korišteni pristup za modeliranje proizvodnje SE temeljen je na radu Marcos i dr. [48] uz odgovarajuću doradu kako je objašnjeno u nastavku. Iako model [48] ne uvažava prostornu konfiguraciju FN modula, pretpostavlja se da različitosti između prostornih konfiguracija FN modula neće biti značajno izražene kod većine SE.

Model SE kao niskopropusnog filtra definiran jednadžbom (5.19) je djelomično izmijenjen kako bi se uvažila generička topologija SE većih instaliranih snaga koja se sastoji od izmjenjivača, NN AC kabela, NN/SN transformatora i SN kabela do mjesta priključka u SN bloku trafostanice SN/VN preko koje se energija isporučuje u elektroenergetsku mrežu. Izmjene u odnosu na inicijalni model [48] su navedene u nastavku:

- Parametar K koji predstavlja omjer nazivne snage NN/SN transformatora i referentnog sunčevog zračenja zamijenit će se s omjerom instalirane snage SE i referentnim sunčevim zračenjem ($G_{ref}=1000 \text{ Wm}^{-2}$).
- Uvažat će se energetske gubici u izmjenjivaču kod prekoračenja maksimalne snage izmjenjivača, a model hipotetskog filtra primijenit će se prije izračuna gubitaka u izmjenjivaču.
- Drugi efekti poput temperaturnog utjecaja na efikasnost FN modula uvažat će se također prije primijene hipotetskog filtra da se spriječe fluktuacije snage zbog temperature.
- Uvažavajući prethodno spomenutu generičku topologiju SE, gubici u SE će se raščlaniti po komponentama sukladno standardnoj proceduri proračuna proizvodnje SE opisanoj u poglavlju 2.2.

5.5.2.2 Procjena površine SE

Glavni utjecajni faktor na smanjenje fluktuacija sunčevog zračenja ima površina SE. Međutim, površina SE nije unaprijed poznata i potrebno je istu procijeniti iz instalirane snage SE. Broj FN modula po jedinici površine za SE ovisi o karakteristikama terena i o projektiranom faktoru pokrivenosti površine (GCR, engl. *ground coverage ratio*). GCR faktor se definira kao omjer duljine FN modula okomite na duljinu niza L_{FN} i udaljenosti između susjednih nizova FN modula R_{FN} :

$$GCR = \frac{L_{FN}}{R_{FN}} \quad (5.24)$$

GCR se može definirati i kao omjer aktivne površine SE, tj. površine FN modula i ukupne površine SE. Vrijednost GCR faktora se teorijski može kretati u rasponu između 0 i 1. Za SE s fiksnom montažnom konstrukcijom, tipične vrijednosti GCR-a se kreću u širokom rasponu od 0,15 do 0,68 [132]. Odabirom manje vrijednosti GCR faktora povećava se udaljenost između susjednih redova FN modula i time smanjuju gubici zbog zasjenjenja. Dakle, odabir GCR faktora svojevrsan je kompromis između povećanja površine SE i manjih gubitaka u proizvodnji.

Gubici zasjenjenja između susjednih FN nizova dominantnije su prisutni u zimskim mjesecima kada je Sunce nisko na horizontu. Odabir GCR faktora također je potrebno uskladiti i s nagibom montažne konstrukcije FN modula budući da će kod većeg nagiba konstrukcije uz isti GCR gubici zasjenjenja biti veći.

U daljnjem tijeku rada, površina SE određena je iz instalirane snage SE korištenjem faktora pokrivenosti površine $GCR=0,5$. Snaga novijih FN modula po jedinici površine je tipično cca 210 W/m^2 , iz čega slijedi da aktivna površina FN modula potrebna za SE instalirane snage 1 MWp iznosi cca 4760 m^2 . Uz faktor pokrivenosti površine $GCR=0,5$ slijedi da je zahtijevana površina SE jednaka 9520 m^2 . Stvarna površina biti će nešto veća zbog internih prometnica, trafostanica i sl. pa se za ukupnu površinu SE uzima 10000 m^2 odnosno 1 Ha. Dakle, uz odabrani GCR faktor može se pretpostaviti da je potrebna površina SE 1 MWp/Ha.

5.5.2.3 Pretvorba komponenti sunčevog zračenja u efektivno zračenje

Pretvorba mjerenih komponenti GHI i DHI u efektivno zračenje pod kutem FN modula provedena je u programskom paketu Python pomoću biblioteke pvlib [133]. Korištena je sljedeća procedura:

- Iz GHI i DHI izračunat je DNI uvažavanjem geometrije kretanja Sunca na lokaciji SE.
- Korištenjem GHI, DHI i DNI izračunato je POA zračenje primjenom jednostavnog izotropskog modela atmosfere [71].

Pri proračunu DNI iz GHI i DHI potrebno je pripaziti na specifičan slučaj kada je kut zenita θ relativno blizu 90° , jer u tom slučaju $\cos(\theta) \approx 0$ pa DNI može poprimiti izrazito visoke vrijednosti. U biblioteci pvlib moguće je definirati granični kut zenita pri kojim se vrijednosti DNI postavljaju na vrijednost *NaN* (engl. *Not a Number*) i izostavljaju iz vremenskog niza ukoliko pri kutu većem od graničnog vrijednost DNI nije jednak nuli.

Za izračun POA zračenja pretpostavljena je SE kod koje su svi FN moduli orijentirani prema jugu (azimut 0°) uz kut naklona 20° .

5.5.2.4 Energetski gubici u sunčanoj elektrani

Sastavnice energetskih gubitaka u SE prikazane su tablici 5-2, a uzete su kao fiksni gubici neovisno o radu SE. Zasebno od sastavnica gubitaka navedenih u sklopu tablice 5-2, dodatno su uvaženi gubici zbog smanjenja efikasnosti FN modula uslijed povišene temperature i gubici u izmjenjivačima kao posljedica prekoračenje maksimalne snage izmjenjivača (engl. *inverter clipping losses*). Potonji se javljaju kada proizvodnja FN modula, tj. DC snaga izmjenjivača premaši maksimalnu snagu izmjenjivača definiranu od proizvođača. Temperaturni gubici u FN modulima i gubici u izmjenjivačima obrađeni su detaljnije u potpoglavljima u nastavku.

Ako se pojedina sastavnica gubitaka označi u postotnom iznosu kao $L_j(\%)$, ukupni gubici u SE mogu se raspisati primjenom sljedeće jednadžbe:

$$L_{uk} = 1 - \prod_j \left(1 - \frac{L_j(\%)}{100} \right) \quad (5.25)$$

Proizvodnju SE potrebno je korigirati za iznos ukupnih gubitaka. Međutim, budući da će gubici u izmjenjivaču ovisiti o radnoj snazi na ulazu u izmjenjivač, korisnije je podjelu napraviti na gubitke prije izmjenjivača (DC gubici) i gubitke nakon izmjenjivača.

Tablica 5-2 Sastavnice gubitaka u SE

Sastavnica gubitaka	Postotni iznos gubitaka
Onečišćenja	2,0%
Zasjenjenje	2,0%
Neusklađenost FN modula	1,5%
Degradacija prouzrokovana svjetlošću (LID, engl. <i>lightning induced degradation</i>)	1,0%
Ožičenje	1,5%
Izmjenjivač	1,5%
AC ožičenje	0,5%
NN/SN transformator	0,5%
SN kabel	0,5%

Ako se faktor gubitaka zbog temperaturnog utjecaja naznači kao f_t^{temp} (potpoglavlje 5.5.2.5), ukupne gubitke prije ulaza u izmjenjivač moguće je raspisati kao:

$$L_{uk,t}^{DC} = 1 - f_t^{temp} \cdot \prod_j \left(1 - \frac{L_j^{DC}(\%) }{100} \right), t \in T \quad (5.26)$$

gdje je $L_j^{DC}(\%)$ pojedina sastavnica DC gubitaka.

5.5.2.5 Utjecaj temperature na efikasnost FN modula

Povećanje temperature FN modula negativno utječe na smanjenje efikasnosti FN modula, a gubitke zbog temperaturnog utjecaja je potrebno uvažiti budući da sačinjavaju znatan udio u ukupnim gubicima SE.

Proračun povećanja/smanjenja efikasnosti FN modula s obzirom na promjene temperature proveden je korištenjem Faimanovog empirijskog modela [134] implementiranog u biblioteci pvlib. Faimanov model izračunava temperaturu FN modula preko temperature zraka, POA zračenja i brzine vjetra na visini FN modula (vjetar pozitivno utječe na hlađenje FN modula).

Podaci o brzini vjetra na visini FN modula nisu direktno dostupni, već su procijenjeni preko Hellmannovog eksponencijalnog zakona korištenjem podataka mjerene brzine vjetra na gondoli VA:

$$v_t^{FN} = v_t^{VA} \cdot \left(\frac{H_{FN}}{H_{VA}} \right)^\chi \quad (5.27)$$

gdje su:

v_t^{FN} brzina vjetra na visini FN modula H_{FN} ,

v_t^{VA} brzine vjetra mjerena na gondoli VA visine H_{VA} ,

χ Hellmanov eksponent, koji se uzima $\chi=1/7$ sukladno [135].

Faktor gubitaka zbog temperaturnog utjecaja, korišten u jednadžbi (5.26), definiran je sljedećom jednadžbom:

$$f_t^{temp} = 1 + \theta^{p, FN} \cdot (T_t^{FN} - 25^\circ\text{C}), \quad t \in T \quad (5.28)$$

gdje su:

$\theta^{p, FN} = -0,42\%/^\circ\text{C}$ temperaturni koeficijent snage FN modula (deklariran od proizvođača FN modula),

T_t^{FN} temperatura FN modula proračunata Faimanovim empirijskim modelom.

5.5.2.6 Model izmjenjivača

Energetski gubici u izmjenjivaču javljaju se u normalnom pogonu zbog same efikasnosti izmjenjivača i izvanredno tijekom ograničenja snage u periodima kada je ulazna snaga u izmjenjivač (DC snaga) veća od maksimalne izlazne snage izmjenjivača. Prva sastavnica gubitaka u redovitom pogonu općenito ovisi o opterećenju, a karakterizirana je praktički konstantnom krivuljom efikasnosti za opterećenje od 20%-100% (uz blagi opadajući trend pri većim opterećenjima, ali u prosjeku 1,0% – 2,0% kod modernih izmjenjivača veće snage) te strmijim padom efikasnosti kod manjih opterećenja (<10%). Za potrebe modela, pretpostavljeni su fiksni gubici u izmjenjivaču koji prema tablici Tablica 5-2 iznose 1,5%.

Druga sastavnica gubitaka odnosi se na gubitke koji se javljaju samo u periodima kada je ulazna snaga izmjenjivača veća od maksimalne izlazne snage. Tipična je praksa kod SE korištenje veće instalirane snage FN modula u odnosu na nazivnu snagu izmjenjivača, poznato kao i DC/AC omjer, budući da se time [79]:

- povećava udio proizvodnje SE pri većim snagama (vršna proizvodnja FN modula se rijetko javlja),
- kompenziraju energetske gubitke u SE i degradacija FN modula tijekom životnog vijeka modula i
- unaprjeđuje ekonomija projekta.

Standardna je upotreba DC/AC omjera između 1,1 – 1,3 za SE veće instalirane snage. Jasno je da će veći DC/AC omjer rezultirati većim iznosom energetskih gubitaka u izmjenjivaču zbog efekta „rezanja“ vršne snage. Naime, izmjenjivači posjeduju tzv. strujni limit koji štiti energetske elektronike od prekomjernih opterećenja i oštećenja, a najčešće je podešen na 110% vrijednosti nazivne snage izmjenjivača. Dakle, preopterećenja invertera do 10% su moguća, ali ne i u trajnom pogonu, budući da su ograničena temperaturom elektronike zbog koje je potrebno reducirati izlaznu snagu izmjenjivača kod većih temperaturnih opterećenja. U svrhu modeliranja SE uzima se nazivna snaga izmjenjivača kao ograničavajući faktor (umjesto maksimalne snage), a izlazna snaga izmjenjivača računa na sljedeći način:

$$P_t^{inv} = \begin{cases} P^{inv,n}, & \text{ako } P_t^{inv,DC} \geq P^{inv,n} \\ P_t^{inv,DC}, & \text{inače} \end{cases} \quad (5.29)$$

gdje su

$P_t^{inv,DC}$ ulazna DC snaga u izmjenjivač (proizvodnja FN modula umanjena za sve sastavnice gubitaka do izmjenjivača, uključujući i efikasnost samog izmjenjivača),

$P^{inv,n}$ nazivna snaga izmjenjivača.

Formulacija jednadžbe (5.29) moguća je i uz zamjenu nazivne snage izmjenjivača s maksimalnom snagom, ako se uzme u obzir da je kratkotrajno preopterećenje izmjenjivača dozvoljeno do 110% nazivne vrijednosti. U nastavku rada, kao DC/AC omjer odabrana je vrijednost 1,1, a za izračun gubitaka zbog rezanja snage u izmjenjivaču korištena je jednadžba (5.29). Korišten pristup je ekvivalentan DC/AC omjeru od 1,21 u slučaju kada bi ograničenje snage bilo pri maksimalnoj snazi izmjenjivača.

Kod većih SE moguće su konfiguracije s centralnim ili string inverterima. Kod konfiguracije s centralnim inverterima koristi se manji broj invertera znatno veće nazivne snage (od nekoliko MW) na koji se spaja veći broj FN polja. Takvi izmjenjivači najčešće imaju jedan DC/DC pretvarač s funkcijom praćenja točke maksimalne snage s kojim se nastoji na P-V karakteristici priključenog FN polja podešenjem napona iskoristiti maksimalna snaga. Glavni nedostatak primjene centralnih invertera je to što kod neravnih terena ili zasjenjena FN modula nije moguće pronaći radnu točku u kojoj će svi ili većina priključenih FN nizova raditi s maksimalnom snagom. Zato je u posljednje vrijeme ipak češća primjena string invertera, čija je nazivna snaga značajno manja od nazivne snage centralnih invertera, a posljednjih godina se postepeno povećava (u 2022. godini nazivna snaga većine string izmjenjivača za veće elektrane je u rasponu 200-350 kVA). String inverteri posjeduju veći broj MPPT ulaza, a po pojedinom ulazu preuzimaju manji broj FN nizova zbog čega mogu točnije pratiti točku maksimalne snage pojedinih nizova i povećati efikasnost SE.

Sa stanovišta modeliranja SE, sama konfiguracija SE bitna je općenito za procjenu gubitaka, ali i za izračun gubitaka pri višim vremenskim rezolucijama. Kao što je pokazano u [136], gubici zbog rezanja snage u izmjenjivačima također ovise i o korištenoj vremenskoj rezoluciji, što je i očekivano s obzirom na fluktuacije proizvodnje u FN modulima. Međutim, fluktuacije ulazne snage ovisit će i o korištenoj konfiguraciji izmjenjivača [126]. Veće fluktuacije ulazne snage izmjenjivača očekuju se kod primjene string invertera u odnosu na centralne invertere budući da je priključen manji broj FN modula po izmjenjivaču, odnosno priključeni FN moduli su koncentrirani na manjem području i prekrivaju manju površinu. Dakle, za očekivati je da će veće fluktuacija ulazne snage kod string invertera rezultirati nešto većim gubicima zbog prekoračenja nazivne/maksimalne snage.

Utjecaj povećanja gubitaka u izmjenjivaču kod primjene različitih vremenskih rezolucija nije daljnji predmet ovog rada. U tu svrhu, pretpostavlja se da razlike između gubitaka u izmjenjivaču pri različitim vremenskim rezolucijama nisu izražene, a korišteni model izmjenjivača se modelira kao jedinstveni izmjenjivač čija je nazivna snaga definirana DC/AC omjerom. Efekti gubitaka u izmjenjivaču pri različitim rezolucijama nisu modelirani.

5.5.3 Ograničenja predloženog modela sunčane elektrane

U nastavku su ukratko iznesena glavna ograničenja predloženog modela SE. S obzirom da je model zasnovan na radu [48], predloženi model dijeli ograničenja poput kašnjenja vremenske serije proizvodnje u odnosu na ulazno sunčevo zračenje zbog primjene linearnog filtriranja. Također, model ne uzima u obzir druge utjecajne faktore poput prostorne konfiguracije FN modula na lokaciji, karakteristike terena i brzine kretanja oblaka.

Specifično za predloženi model, s obzirom da je riječ o elektranama većih instaliranih snaga, u modelu se zanemaruje odbačena proizvodnja na razini pojedinog izmjenjivača zbog različitosti proizvodnje pojedinih FN nizova priključenih na izmjenjivač. Kao što je prethodno navedeno, kompletna elektrana modelirana je kao da postoji jedan izmjenjivač. Takav pristup ekvivalentan je pretpostavci da je proizvodnja FN modula

jednoliko raspodijeljena po ukupnom broju izmjenjivača, a da su gubici kao posljedica prekoračenja maksimalne snaga izmjenjivača jednaki na svim izmjenjivačima. U stvarnosti je moguće očekivati nejednoliko proizvodnju po izmjenjivačima, a osobito tijekom naoblake. Dakle, efekt rezanja snage na razini izmjenjivača može biti nešto izraženiji u odnosu na pretpostavljenu jednoliko raspodjelu.

Nadalje, pojedine sastavnice energetskih gubitaka u SE pretpostavljene su konstantnima neovisno o opterećenju. Prethodno se prvenstveno odnosi na omske gubitke u DC ožičenju, efikasnost izmjenjivača i omske gubitke u AC dijelu. Omski gubici su proporcionalni kvadratu struje i samim time imaju veće vrijednosti u periodima veće proizvodnje. Međutim, za točnije modeliranje omskih gubitaka potrebno je poznavati točnu topologiju elektrane, odnosno raspodjelu opterećenja po kabelima, kao i tipove i duljine kabela. Slično vrijedi i za gubitke u transformatoru, koji se mogu podijeliti na gubitke praznog hoda (fiksni gubici) i gubitke u bakru (varijabilni dio), gdje je potrebno poznavati broj i tehničke parametre transformatora za izračun točnijih gubitaka. Povećanjem nazivne snage mijenja se broj kabelskih izvoda, nazivna snaga transformatora i sl., što otežava procjenu gubitaka.

Kod izmjenjivača, kao što je prethodno navedeno, gubici također ovise o opterećenju. Dodatna razina kompleksnosti uzrokovana je činjenicom da u elektrani postoji veći broj izmjenjivača koji mogu biti nejednoliko opterećeni pa se opet otvara prethodno iznesena problematika.

5.6 Pregled predloženog modela hibridne elektrane

5.6.1 Topologija modela hibridne elektrane

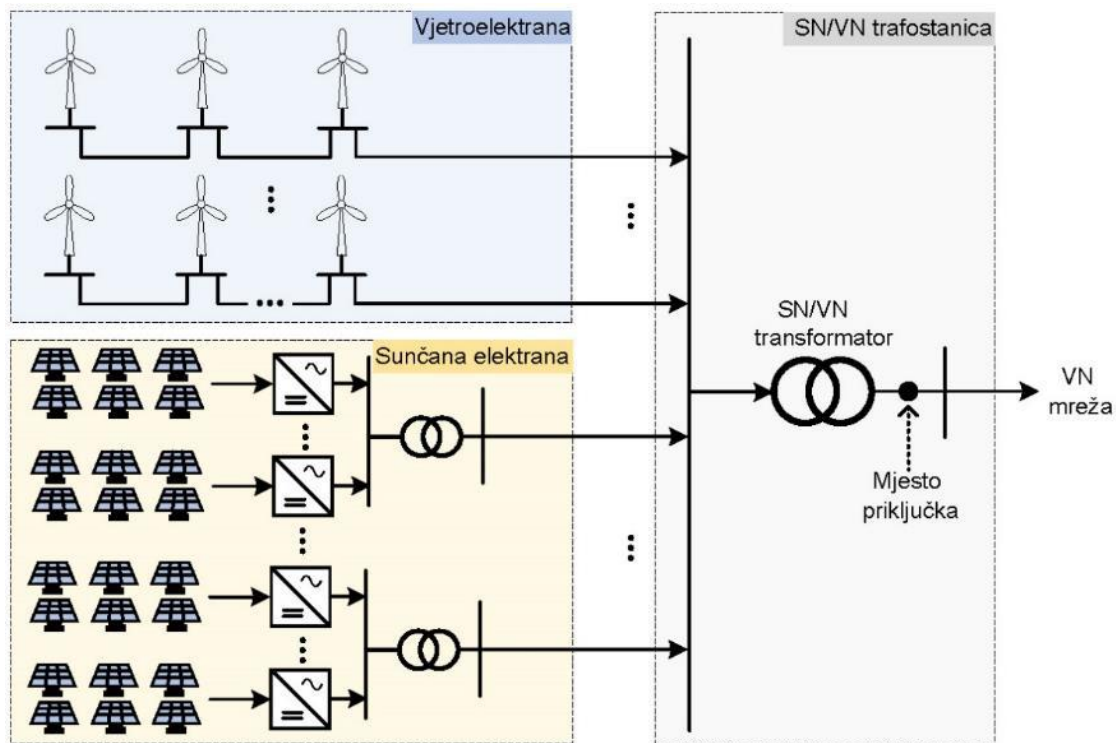
Za predloženi model korištena je topologija modela hibridne elektrane sa zajedničkim AC sabirnicama, s obzirom da su topologije hibridne elektrane sa zajedničkim DC sabirnicama rijetko primjenjuju i to samo za elektrane manjih instaliranih snaga (npr. u mikromrežama). Najčešće korištena topologija za velike VE i SE je ona u kojoj su VE i SE direktno povezani kabelskim vodovima na pripadajuća SN vodna polja u TS SN/VN, a preko transformatora SN/VN evakuiraju proizvedenu električnu energiju u mrežu.

Tipičan primjer za SE prema današnjoj tehnologiji je primjena FN nizova maksimalnog napona do 1500 V koji se priključuju na DC ulaze u izmjenjivače u string izvedbi, pri čemu je izlazni napon izmjenjivača najčešće 0,8 kV. Na interne trafostanice (ITS) 0,8/33 kV (ili neki drugi napon interne srednjenaponske mreže) priključuje se više string izmjenjivača, ovisno o nazivnoj snazi transformatora 0,8/33 kV. Priključak ITS na SN blokove u TS 33/110 kV izvodi se preko SN kabela, pri čemu broj SN blokova i ITS direktno ovisi o instaliranoj snazi SE.

Kod VE, SN blokovi se nalaze u podnožju svakog VA, što omogućava efikasnije povezivanje VA i optimizaciju duljine trase SN kabela. Transformacija napona vjetrogeneratora ostvaruje se transformatorom x/33 kV koji se može nalaziti u podnožju VA ili za veće snage VA u gondoli VA.

U slučaju korištenja sustava za pohranu električne energije, integracija istog moguća je također na pripadajuća SN polja, tj. kod korištenja ovakve topologije pojednostavljena je fleksibilnost proširenja.

Topologija razmatrane hibridne elektrane prikazana je na slici 5-38. Mjesto priključenja na mrežu je na VN strani (npr. 110 kV) pa je za potrebe izračuna energetskih gubitaka zbog ograničenja priključne snage potrebno uvažiti gubitke u energetskom transformatoru SN/VN (ili više njih ako je riječ o paralelnom radu transformatora) koji su zajednički za hibridnu elektranu.



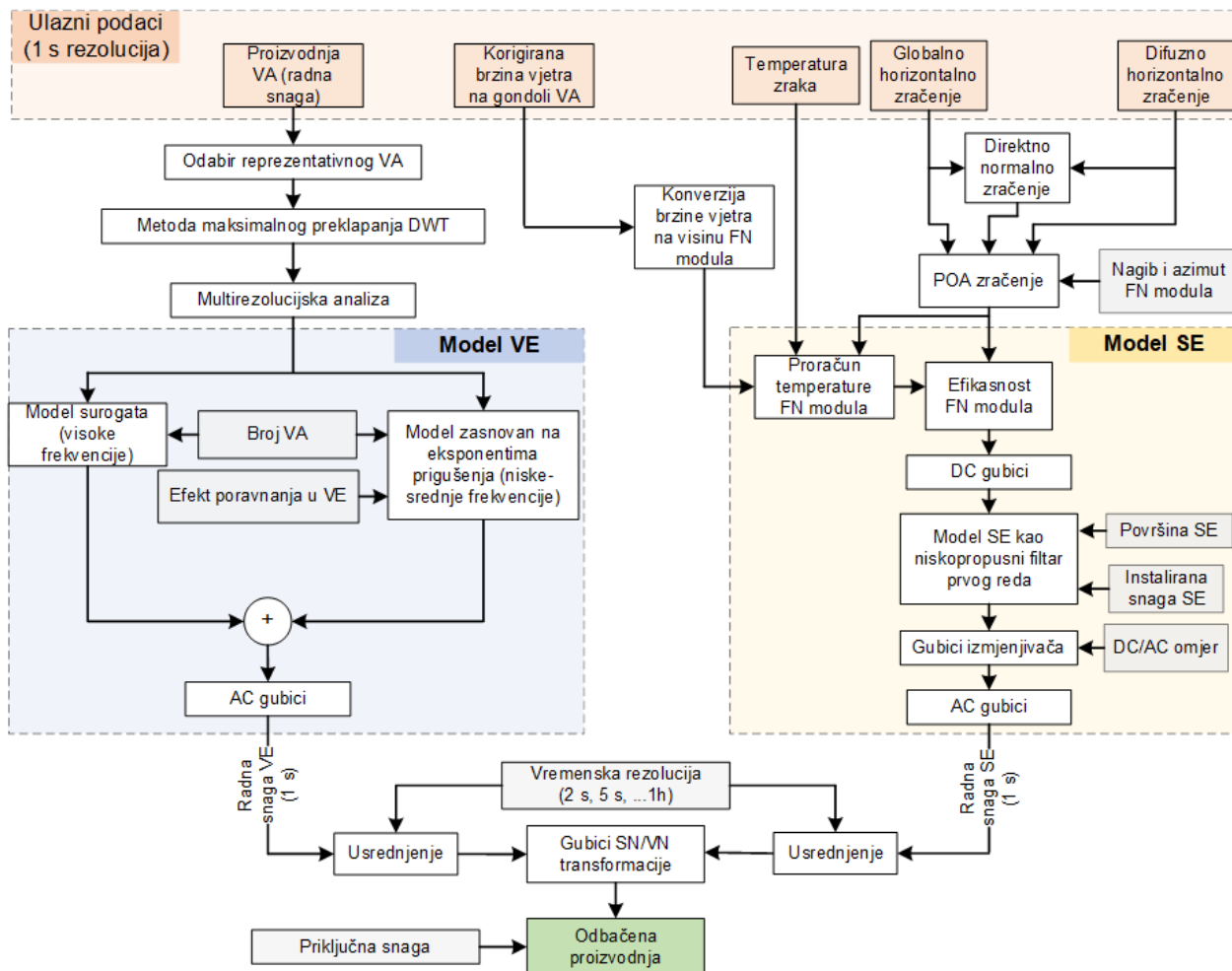
Slika 5-38 Topologija razmatrane hibridne VE i SE

Dakle, model hibridne elektrane prema topologiji sa slike 5-38, u osnovni se sastoji od modula VE (potpoglavlje 5.4) i modula SE (potpoglavlje 5.5) te TS SN/VN.

5.6.2 Pregled modela

Model hibridne elektrane za visoke vremenske rezolucije prikazan je na slici 5-39. Grafički prikaz ilustrira sve korištene vremenske serije ulaznih podataka, uključene korake tijekom obrade i tretmana ulaznih podataka, operacije unutar modula VE i SE, te izlazne manipulacije nad vremenskim serijama proizvodnje VE i SE.

Izlaz modela hibridne elektrane je vremenska serija proizvodnje VE + SE na mjestu priključka u pripadajućoj vremenskoj rezoluciji, koja je osnova za izračun odbačene proizvodnje. Predloženi model hibridne elektrane primijenjen je u poglavlju 6.



Slika 5-39 Pojednostavljeni grafički prikaz modela hibridne elektrane za visoke vremenske rezolucije

6. ANALIZA ODBAČENE PROIZVODNJE PRI VISOKIM VREMENSKIM REZOLUCIJAMA

Primjenom viših vremenskih rezolucija moguće je preciznije uvažiti stvarne fluktuacije snage vjetroelektrana (VE) i solarnih elektrana (SE), što rezultira točnijom procjenom odbačene proizvodnje u hibridnim elektranama. Međutim, visoka vremenska rezolucija postavlja zahtjev za implementacijom odgovarajućih modela VE i SE, koji će adekvatno uzeti u obzir efekt poravnanja, tj. prigušenje fluktuacija proizvodnje temeljeno na veličini VE i SE. U poglavlju 4, gdje je korištena niža rezolucija, procjena odbačene proizvodnje na osnovu različitih omjera priključne i instalirane snage postignuta je metodom skaliranja instalirane snage VE i SE prema željenim vrijednostima. Ovakav pristup skaliranja bio je primjeren s obzirom na ograničenu razlučivost korištenih podataka. No, pri visokim vremenskim rezolucijama, ovakva metoda skaliranja postaje neadekvatna jer fluktuacije proizvodnje u domeni viših frekvencija ne prate linearno povećanje instalirane snage. Drugim riječima, za analize odbačene proizvodnje uz više vremenske rezolucije i pri variranju instalirane snage VE i SE, neophodan je model koji adekvatno reflektira efekt poravnanja.

Stoga je kao temelj za analizu odbačene proizvodnje korišten specijalizirani model hibridne elektrane koji je razvijen u prethodnom poglavlju. Ovaj model uzima u obzir efekt poravnanja, a koji je u literaturi zanemaren. Primjenom ovog modela omogućava se detaljnije ispitivanje:

- promjene odbačene proizvodnje pri različitim vremenskim rezolucijama kao posljedica promjene priključne i instalirane snage hibridne elektrane te promjenu udjela VE i SE u hibridnoj elektrani i
- utjecaj veličine hibridne elektrane, odnosno VE i SE, na odbačenu proizvodnju hibridne elektrane.

Dio iznesenih rezultata u sklopu ovog poglavlja zasnovan je na objavljenom radu [101].

6.1 Ulazni podaci

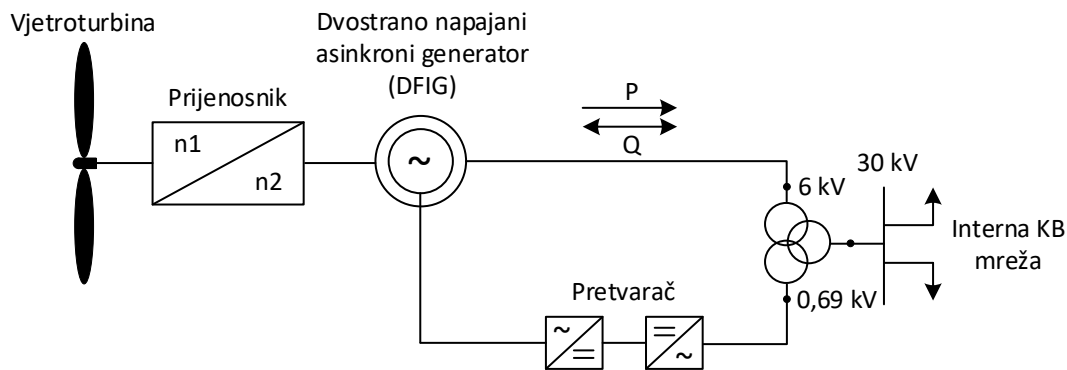
6.1.1 Podaci za VE

Podaci za VE preuzeti su s operativne vjetroelektrane u Hrvatskoj čija je instalirana snaga cca 49 MW. VE se sastoji od 16 VA, pri čemu su devet VA snage 3200 kW i preostalih sedam VA snage 2850 kW. Podaci su deponirani na Zenodo repozitorij [103]–[106].

Vjetroagregati su horizontalnog tipa rotora, s tri lopatice promjera 103 m i visinom gondole 98,3 m. Opremljeni su dvostrano napajanim asinkronim generatorima (DFIG, engl. *doubly-fed induction generator*) sa sustavom pretvarača u rotorskom strujnom krugu (slika 6-1).

Pretvarač se sastoji od AC/DC ispravljača na rotorskoj strani, DC međukruga te DC/AC izmjenjivača na niskonaponskoj strani (0,69 kV) koji se priključuje na tercijar tronamotnog transformatora. U pretvaračkom sklopu se vrši konverzija promjenjive frekvencije generatora u rotorskom krugu na fiksnu mrežnu frekvenciju (50 Hz), čime se omogućava varijabilna brzina vrtnje i regulacija tokova radne i jalove snage. Statorski krug direktno je priključen na sekundar tronamotnog transformatora na nazivnom naponu 6 kV.

Generator isporučuje snagu u 30 kV sredjenaponsku mrežu preko tronamotnog transformatora 30/6/0,69 kV.

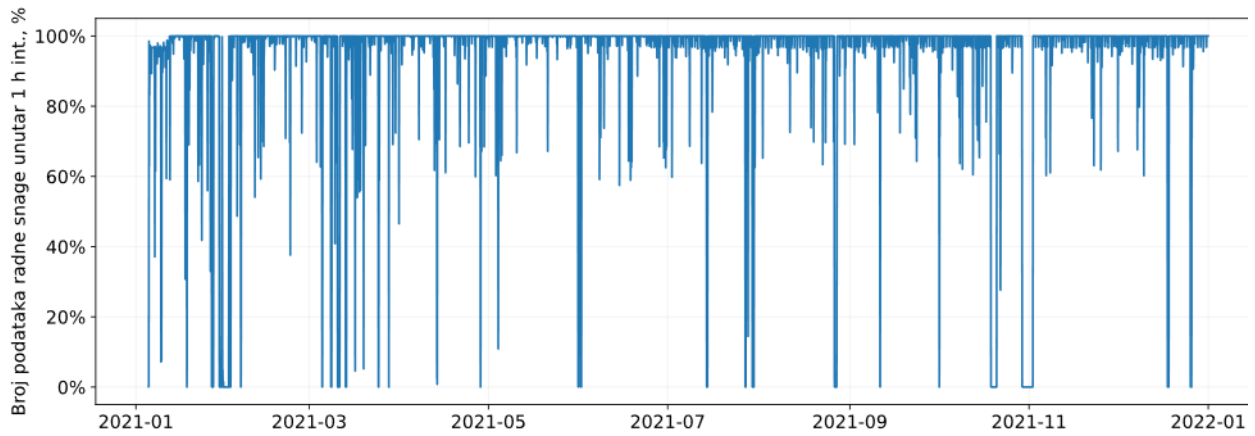


Slika 6-1 Shema VA s dvostrano napajanim asinkronim generatorom

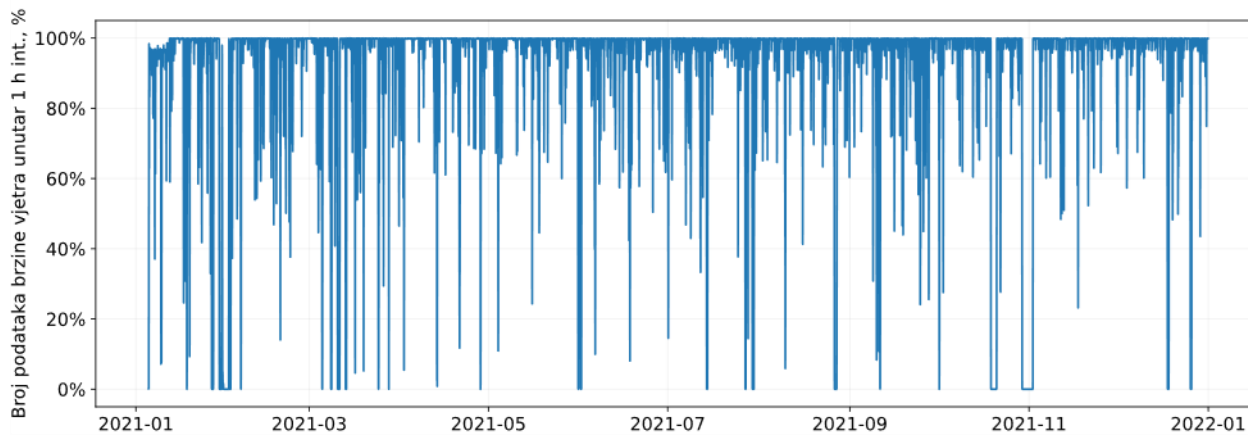
Prikupljeni podaci uključuju mjerenja neto radne snage svakog VA u VE i brzinu vjetra mjerenu na gondoli svakog VA. Neto radna snaga podrazumijeva zbroj snage na statoru i rotoru, umanjena za vlastitu potrošnju VA, prije transformacije napona u SN mrežu. Gubici u transformatoru uzeti su u obzir naknadno.

Mjerenja su dostupna u 1 sekundnoj rezoluciji u periodu od 5.1.2021. do 31.12.2021. Raspoloživost mjernih podataka za jedan VA prikazana je na slici 6-2. Na predmetnoj slici raspoloživost je prikazana u postotnom iznosu tijekom 1 h intervala, gdje 100% predstavlja 1 h intervale u kojima je raspoloživo svih 3600 sekundnih vrijednosti unutar intervala, a 0% znači da u danom intervalu mjerenja nisu zabilježena. Vremenski intervali u kojima je zabilježena niska raspoloživost podataka obično su uzrokovani nedostupnosti SCADA (engl. *Supervisory Control and Data Acquisition*) sustava. Sa slike 6-2 primjetno je da podaci proizvodnje VA (radne snage) u prosjeku imaju veću raspoloživost u odnosu na mjerenja brzine vjetra. Na postotnoj razini nedostupnost podataka za ostale VA je slična kao i za prikazani VA.

Nedostupni podaci sa SCADA sustava se javljaju nasumično, najčešće po jedan 1 s podatak u nepravilnim periodima. Poklapanje nedostupnih podataka između VA nije učestalo, tj. za svaki VA nedostupni podaci u datom intervalu se ne javljaju istovremeno.



(a)



(b)

Slika 6-2 Raspoloživost podataka (a) radne snage VA i (b) korigirane brzine vjetra mjerene na gondoli VA

Raspoloživost podataka radne snage i brzine vjetra po mjesecima za VA1 prikazana je u tablici 6-1.

Tablica 6-1 Raspoloživost mjerenih podataka radne snage i brzine vjetra na gondoli VA1

Mjesec	Raspoloživost radne snage (%)	Raspoloživost brzine vjetra (%)
Siječanj	72,6%	71,5%
Veljača	94,4%	92,5%
Ožujak	92,4%	91,6%
Travanj	98,5%	97,0%
Svibanj	98,4%	97,4%
Lipanj	97,8%	95,5%
Srpanj	95,5%	93,6%
Kolovoz	96,6%	95,1%
Rujan	98,8%	95,4%
Listopad	84,3%	83,8%
Studeni	95,0%	93,4%
Prosinac	96,2%	95,0%
Ukupno:	93,3%	91,2%

Budući da se nedostupni podaci javljaju nasumično po vjetroagregatima, primijenjena je linearna interpolacija podataka odvojeno za svaki VA. Alternativni pristup odbacivanja nedostupnih podataka je također moguć, ali nije primijenjen jer se nedostupni podaci uglavnom ne javljaju istovremeno po vjetroagregatima.

Potrebno je napomenuti da i primjena linearne interpolacije može uzrokovati smanjenje fluktuacija VA. Unutar intervala interpolacije, zanemaruju se razine fluktuacije snage i smanjuju potencijalne vršne vrijednosti snage. Očekuje se da će predmetna nedostupnost podataka i korišteni postupak linearne interpolacije imati odgovarajući utjecaj na rezultate, i to u smjeru smanjenja procijenjene odbačene proizvodnje.

6.1.2 Podaci za SE

Direktna mjerenja izlazne snage velike SE (>1 MWp) pri visokim vremenskim rezolucijama nisu bila dostupna tijekom provođenja istraživanja. U tu svrhu, korištena su mjerenja komponenti sunčevog zračenja pri visokim vremenskim rezolucijama koja su primjenom modela SE prema potpoglavlju 5.5.2 pretvorena u proizvodnju SE.

Ulazni podaci prikupljeni su s mjernih senzora i registracijske opreme montirane u podnožju mjernog stupa koji se nalazi na lokaciji postojeće VE [107]. Korištena je sljedeća oprema:

- piranometar tipa SPN1 Sunshine proizvođača Delta-T,
- integrirani mjerni senzor koji sadrži mjerenja temperature zraka, tlaka i vlažnosti i
- zapisivač podataka (engl. *data logger*) Ammonit Meteo – 40.

Slika 6-3 prikazuje mjerni stup i pripadajuću opremu u podnožju mjernog stupa. Za mjerenje komponenti sunčevog zračenja korišten je piranometar tipa Delta-T SPN1 Sunshine montiran u horizontalnom položaju (Slika 6-4). Budući da je montiran u horizontalnom položaju, piranometar mjeri globalno horizontalno zračenje (GHI) i difuzno horizontalno zračenje (DHI). Piranometar ima i internu mogućnost programskog izračuna direktnog normalnog zračenja (DNI) iz mjerenih komponenti GHI i DHI.

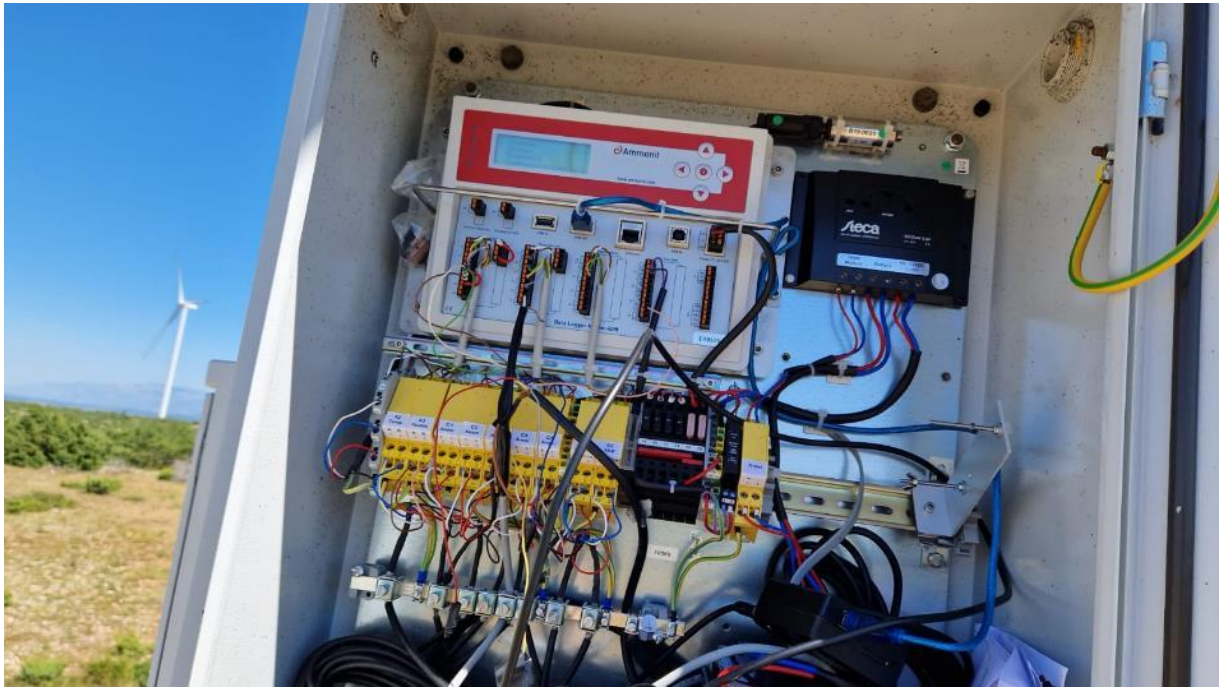
Slika 6-5 prikazuje Ammonit Meteo – 40 zapisivač podataka preko kojega su preuzeti podaci.



Slika 6-3 Mjerni stup (lijevo) i lokacija mjerne i registracijske opreme u donjem dijelu stupa (desno)



Slika 6-4 Piranometar Delta-T Sunshine montiran na mjernom stupu



Slika 6-5 Ammonit logger za prikupljanje mjernih podataka

Loggeri tipa Meteo – 40 mogu prikupljaju meteorološke podatke do 34 mjerena kanala i omogućuju priključak do osam mjernih senzora. Popis svih korištenih mjerenih kanala prikazan je na slici 6-6, pri čemu su za potrebe ovog istraživanja preuzeti podaci sa kanala A4 (globalno horizontalno zračenje, GHI), A5 (difuzno horizontalno zračenje, DHI) i A2 (temperatura zraka).

Label	Evaluation	Origin	Value	Unit	Slope	Offset	Cardinal Direction	Tilt Angle	Sensitivity
An1	Wind Speed	C1	5.6097	m/s	0.045799	0.251198			
An2	Wind Speed	C2	5.2476	m/s	0.045769	0.258771			
An3	Wind Speed	C3	4.0996	m/s	0.045746	0.25696			
An4	Wind Speed	C4	5.0608	m/s	0.045843	0.247262			
An5	Wind Speed	C5	5.5150	m/s	0.045782	0.250029			
Anemometer @3.0m	Wind Speed	C6	4.9400	m/s	0.765	0.35			
Dir1	Wind Direction	D1	34.4219	°	0.3515625	97			
Dir2	Wind Direction	D2	57.6797	°	0.3515625	96			
Hygro/Thermo	Humidity	A3	74.3736	%	100	0			
Hygro/Thermo	Temperature	A2	13.36680	°C	100	-30			
Barometer	Air Pressure	A1	965.8254	hPa	60	800			
Horz	Global Irradiance	A4	42.7259	W/m ²					1000
Tilt	Global Irradiance	A7	0.0000	W/m ²					1000
Horz	Diffuse Irradiance	A5	40.2844	W/m ²					1000
Tilt	Diffuse Irradiance	A8	0.0000	W/m ²					1000
Horz	Estimated DNI	A4, A5	3.8585	W/m ²			0	0	1000
Tilt	Estimated DNI	A7, A8	---	W/m ²			0	20	1000
Horz	Sun Status	D3	1						
Tilt	Sun Status	D4	1						
Horz	Estimated Sun Status	A4, A5	0.0000				0	0	1000
Tilt	Estimated Sun Status	A7, A8	---				0	20	1000

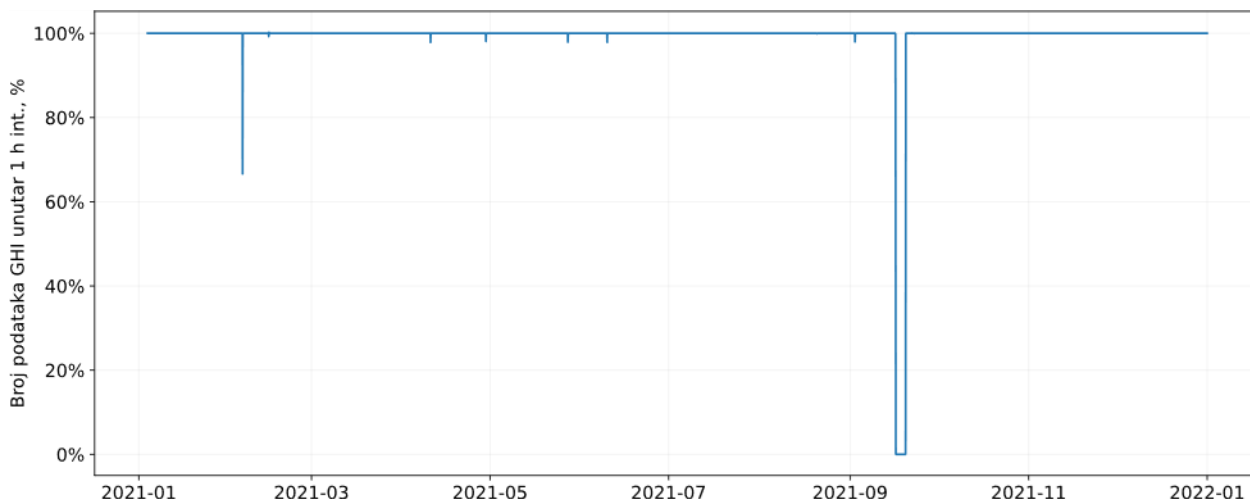
Slika 6-6 Popis mjerenih kanala loggera Ammonit Meteo - 40

Mjerni podaci komponenti sunčevog zračenja i temperature zraka dostupni su za 2021. godinu (isti period kao i kod VE) u 1 sekundnoj rezoluciji. Naglašava se da na lokaciji gdje se nalazi mjerni stup podaci proizvodnje VE nisu bili dostupni u višim vremenskim rezolucijama. Naime, VE na kojoj su dostupna mjerenja iz prethodnog potpoglavlja udaljena je 125 km sjeverozapadno od lokacije mjernog stupa s kojeg su preuzeti podaci za SE. Iako mjerni podaci sunčevog zračenja nisu dostupni na istoj lokaciji na kojoj se nalazi VE (za koju je korištena proizvodnja), pretpostavlja se da prostorna udaljenost neće imati značajan utjecaj na glavne rezultate dobivene u sklopu ovog rada i to iz tri razloga:

1. Karakteristike sunčevog zračenja na lokaciji VE i predmetnoj lokaciji mjerenja sunčevog zračenja su vrlo slične, prvenstveno jer prostorna udaljenost između lokacija nije značajna da bi imala utjecajnu promjenu na proizvodni profil SE.
2. Na osnovu mjerenja s 56 lokacija za VE i 12 lokacija SE u 1 h rezoluciji, Widen [5] je pokazao da je Pearsonov koeficijent korelacije praktično konstantan s obzirom na udaljenost (postoji vrlo slabo opadajući trend koeficijenta korelacije) za udaljenosti VE i SE do 1500 km.
3. Povećanje vremenske rezolucije uzrokovat će značajnije smanjenje anti-korelacije između proizvodnje VE i SE [7], [8], što s obzirom na visoke vremenske rezolucije potpuno poništava komplementarnost proizvodnje VE i SE.

Raspoloživost mjerenja GHI s piranometra tijekom razdoblja mjerenja u postotnim iznosima tijekom 1 h intervala prikazana je na slici 6-7. Ista raspoloživost vrijedi za DHI i temperaturu zraka. Primjetno je da je

raspoloživost podataka s prikupljača podataka Ammonit Meteo – 40 izrazito visoka tijekom godine, isključivši kraći period 16.9.2021. – 19.9.2021. kada su mjerenja nedostupna.



Slika 6-7 Raspoloživost podataka s piranometra

Dobiveni podaci s mjernog kanala A2 ne daju direktno vremensku seriju temperature zraka, već je riječ o signalu kojeg je potrebno korigirati prema sljedećoj jednadžbi kako bi se dobila temperatura zraka [137]:

$$T_{zr} = 0,1 \cdot A2 - 30^{\circ}\text{C} \quad (6.1)$$

Temperatura zraka korištenja je za proračun zagrijavanja FN modula prema Fainmanovom modelu [134] koji je pojašnjen u potpoglavlju 5.5.2.5.

6.2 Metoda proračuna odbačene proizvodnje

6.2.1 Postupak izračuna kod primjene visokih vremenskih rezolucija

U posljednjim koracima modela hibridne elektrane za visoke vremenske rezolucije, kao rezultat dobivene su vremenske serije izlazne snage VE i SE u 1 s rezoluciji. Različite vremenske rezolucije proizvodnje VE i SE dobivene su pojedinačnim usrednjavanjem (poduzorkovanjem) pripadajućih vremenskih serija na niz drugih vremenskih serija koje uključuju 2 s, 5 s, 10 s, 30 s, 1 min, 2 min, 5 min, 10 min, 15 min, 30 min i 1 h rezoluciju. Nakon usrednjavanja pripadajuće rezolucije i korekcije s gubicima radne snage u energetskom transformatoru dobivena je vremenska serija proizvodnje hibridne elektrane kao osnova za analizu odbačene proizvodnje.

Ponekad se pri evaluaciji odbačene proizvodnje posjeduju različite vremenske rezolucije proizvodnje VE i SE. Tipičan primjer je kada se brzina vjetera mjeri u 10 min rezoluciji, a model SE neovisno o vremenskoj rezoluciji ozračenosti može dati 1 h proizvodnju SE (npr. PVSyst). Međutim, proračun odbačene proizvodnje potrebno je raditi s istom vremenskom rezolucijom i preklopiti vremenske serije proizvodnje VE i SE. Kao što je prethodno navedeno, u tom slučaju moguća su dva pristupa:

1. 10 min podaci proizvodnje VE se mogu usrednjiti na 1 h podatke, a proračun napraviti u 1 h rezoluciji. U ovom slučaju, govorimo o smanjenju vremenske rezolucije VE.
2. 1 h podaci proizvodnje SE se interpoliraju na 10 min rezoluciju. Ova varijanta je superiornija jer se ovakvim postupkom ne gubi razlučivost podataka VE.

Interpolacijska funkcija s kojom se popunjavaju nepostojeći podaci u 15 min intervalima između dva susjedna satna intervala može biti proizvoljna. Najčešće se koristi konstantna ili linearna interpolacijska funkcija. U prvom slučaju, zabilježeni 1 h podaci se jednostavno kopiraju na susjedne vrijednosti koje nedostaju u vremenskoj seriji, a za kopiranje se može koristiti vrijednost s početka (engl. *forward fill*) ili kraja (engl. *backward fill*) intervala. Kada je riječ o linearnoj interpolaciji, nezabilježene vrijednosti između dva satna intervala se popunjavaju s linearnom funkcijom definiranom sa satnim vrijednostima dva intervala (pravac definiran s dvije krajnje točke intervala). Prethodno, naravno, vrijedi za svaku kombinaciju različitih vremenskih rezolucija VE i SE.

Kako bi se uvažila prethodna problematika nejednakosti vremenskih rezolucija proizvedene snage VE i SE, primijenjen je poseban postupak koji se sastoji od sljedećih koraka:

- Vremenske serije proizvodnje VE i SE u 1 s rezoluciji se usrednjuju na pripadajuće vremenske serije koje mogu biti različite, npr. 1 min za VE i 15 min za SE. Proračun odbačene proizvodnje ovakvim različitim vremenskim rezolucijama VE i SE nije moguće direktno provesti.
- Vremenske serije proizvodnje VE i SE, u ovom slučaju 1 min za VE i 15 min za SE, se interpoliraju na 1 s rezoluciju primjenom konstantne interpolacije odnosno *forward fill* metode.
- Proračun odbačene proizvodnje se provodi u 1 s rezoluciji.

Dakle, neovisno na koju se vremensku rezoluciju podaci usrednjuju, proračun se uvijek vrši u 1 s rezoluciji, iako tako dobivena 1 s rezolucija sadrži razlučivost vremenske rezolucije na koju je inicijalno vremenska serija proizvodnje VE i SE usrednjena.

Kao rezultat izračuna odbačene proizvodnje dobiva se kvadratna matrica dimenzija $R \times R$, gdje je $R = \{1 \text{ s}, 2 \text{ s}, \dots, 1 \text{ h}\}$ skup svih razmatranih vremenskih rezolucija. U stupcima i redcima matrice nalaze se vremenske rezolucije VE i SE, a na križanju stupaca i redaka izračunata odbačena proizvodnja izražena u postotnom iznosu.

U varijantama kada je odbačena proizvodnja analizirana samo za jednake vremenske rezolucije, preuzete su vrijednosti s dijagonale matrice.

6.2.2 Odbačena proizvodnja izračunata modelom VE u odnosu na stvarnu proizvodnju VE

Proračun odbačene proizvodnje provodi se korištenjem modela VE i SE objašnjenih u poglavlju 5. Preciznost procjene odbačene proizvodnje ovisi dijelom i o preciznosti samih modela kojima se ista procjenjuje. Iz tog razloga, u nastavku je napravljena usporedba odbačene proizvodnje pri odabranim vremenskim rezolucijama korištenjem stvarne proizvodnje VA i predloženog modela. Kao što je prethodno pokazano, predloženi model VE zasniva se na odabiru reprezentativnog VA i skaliranju njegove proizvodnje uz očuvanje efekta poravnanja. Takvim načinom skaliranja nastoje se zadržati statistička svojstva fluktuacija snage VE, čime se očekuju i slične razlike u odbačenoj proizvodnji kod primjene različitih vremenskih rezolucija.

Za potrebe ispitivanja, korišteni su podaci za VE i SE prema potpoglavlju 6.1 za cijeli period 2021. godine. Stvarna proizvodnja VE dobivena je zbrajanjem proizvodnje osam VA nazivne snage 3200 kW. Predloženi model VE zasnivan je na odabiru jednog VA od navedenih osam VA. S ciljem dobivanja relevantnije usporedbe rezultata, korišten je prethodno uvedeni pojednostavljeni model VE koji se također zasniva na

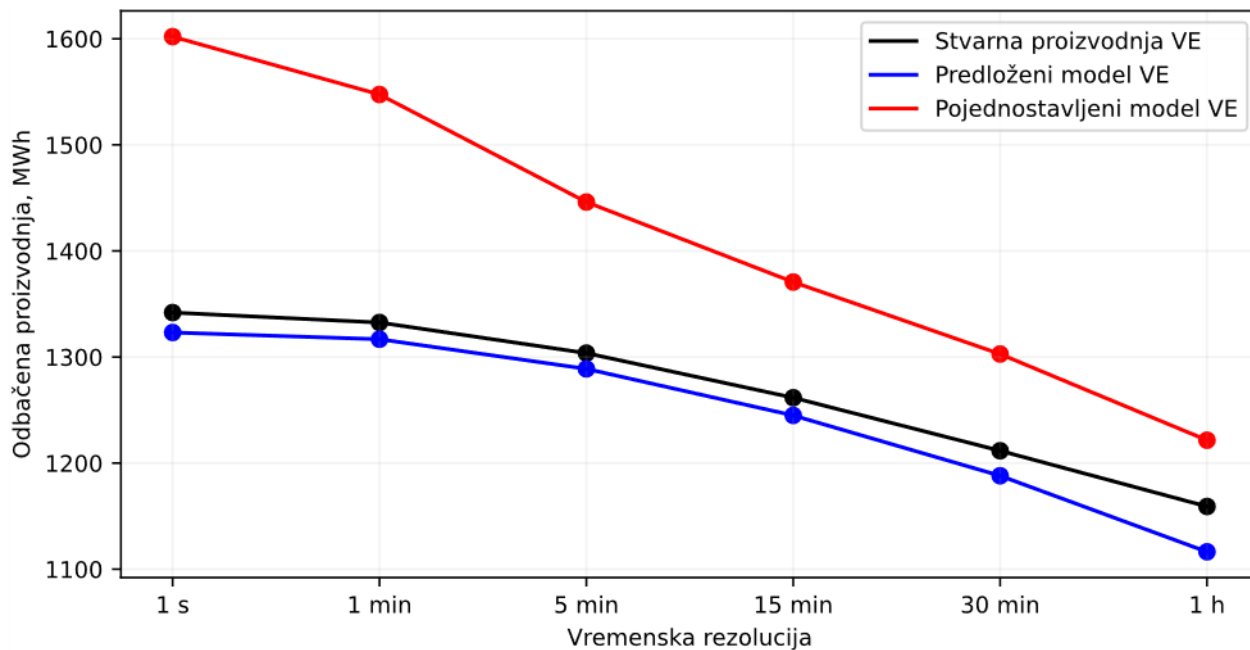
proizvodnji istog VA odabranog za predloženi model VE, ali gdje se skaliranje provodi jednostavnim množenjem proizvodnje odabranog VA s brojem osam (broj VA).

Odbačena proizvodnja računata je uz sljedeće pretpostavke:

- neovisno o modelu VE, za SE je korišten model prema potpoglavlju 5.5.2, a instalirana snaga SE je jednaka instaliranoj snazi VE ($8 \cdot 3,2 \text{ MW} = 25,6 \text{ MWp}$),
- priključna snaga u svim varijantama proračuna iznosi 70% instalirane snage hibridne elektrane.

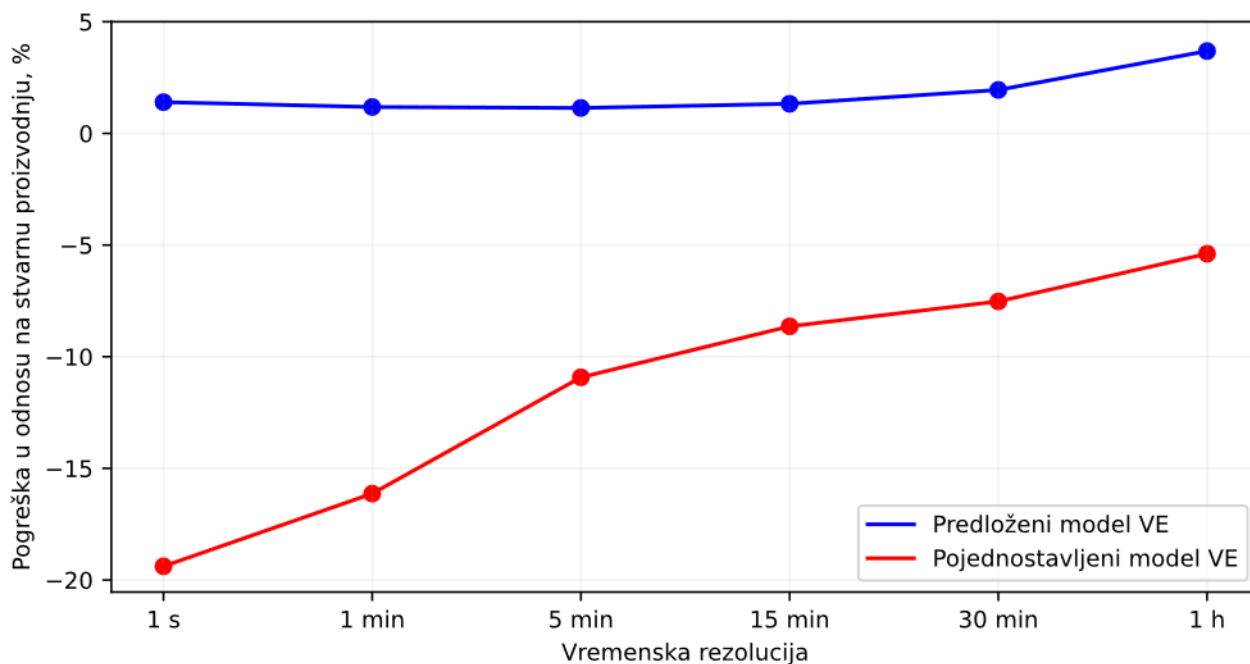
Proračun odbačene proizvodnje najprije je proveden u 1 s rezoluciji, a naknadno su vremenski nizovi usrednjeni na 1 min, 5 min, 15 min, 30 min i 1 h rezoluciju. Odbačena proizvodnja je zasebno računata za pojedinačnu rezoluciju.

Rezultati proračuna odbačene proizvodnje kod korištenja stvarne proizvodnje VE, predloženog modela VE i pojednostavljenog modela VE pri različitim vremenskim rezolucijama prikazani su na slici 6-8. Odbačena proizvodnja izražena je u MWh (ukupni iznos tijekom jedne godine), što u postotnim vrijednostima s obzirom na ukupnu proizvodnju iznosi 1,0% – 1,5%. Kod primjene stvarne proizvodnje i predloženog modela VE dobivene vrijednosti odbačene proizvodnje prate sličan trend pri različitim vremenskim rezolucijama, iako postoje neznatne razlike u iznosu odbačene proizvodnje. Primjetno je da u oba slučaja skraćanjem vremenskih intervala procijenjena odbačena proizvodnja raste brže do 5 min rezolucije, a daljnjim povećanjem vremenske rezolucije porast u procijenjenoj odbačenoj proizvodnji nije izražen. Kod pojednostavljenog modela postoji značajna razlika u trendu rasta procijenjene odbačene proizvodnje. Primjetno je da postoje značajnije razlike između procijenjene odbačene proizvodnje u 5 min, 1 min i 1 s rezoluciji. Razlog navedenom je što pojednostavljeni model ne uzima u obzir efekt poravnanja, tj. fluktuacije snage pri višim vremenskim rezolucijama nisu umanjene već se linearno skaliraju. Ovakvo skaliranje uzrokuje prenaplašene fluktuacije snage u vremenskom nizu te posljedično povećanje pogreške u procjeni odbačene proizvodnje u području viših frekvencija.



Slika 6-8 Usporedba odbačene proizvodnje korištenjem stvarne proizvodnje VE, predloženog modela VE i pojednostavljenog modela VE pri različitim vremenskim rezolucijama

Pogreška u procjeni odbačene proizvodnje, računata kao postotna razlika odbačene proizvodnje računate primjenom stvarne proizvodnje VE i pojedinih modela VE (predloženog i pojednostavljenog), u odnosu na odbačenu proizvodnju dobivenu primjenom stvarne proizvodnje VE, prikazana je na slici 6-9. Uočava se da je pogreška značajno veća kod primijene pojednostavljenog modela VE te da je pogreška osobito izražena kod primijene viših vremenskih rezolucija. Na primjer, korištenjem 1 s rezolucije pojednostavljeni model unosi pogrešku do 20% u odnosu na stvarni model VE, a pri 5 min rezoluciji približno 10%. Kod predloženog modela pogreška je <1,5% za vremenske rezolucije 1 s – 15 min.

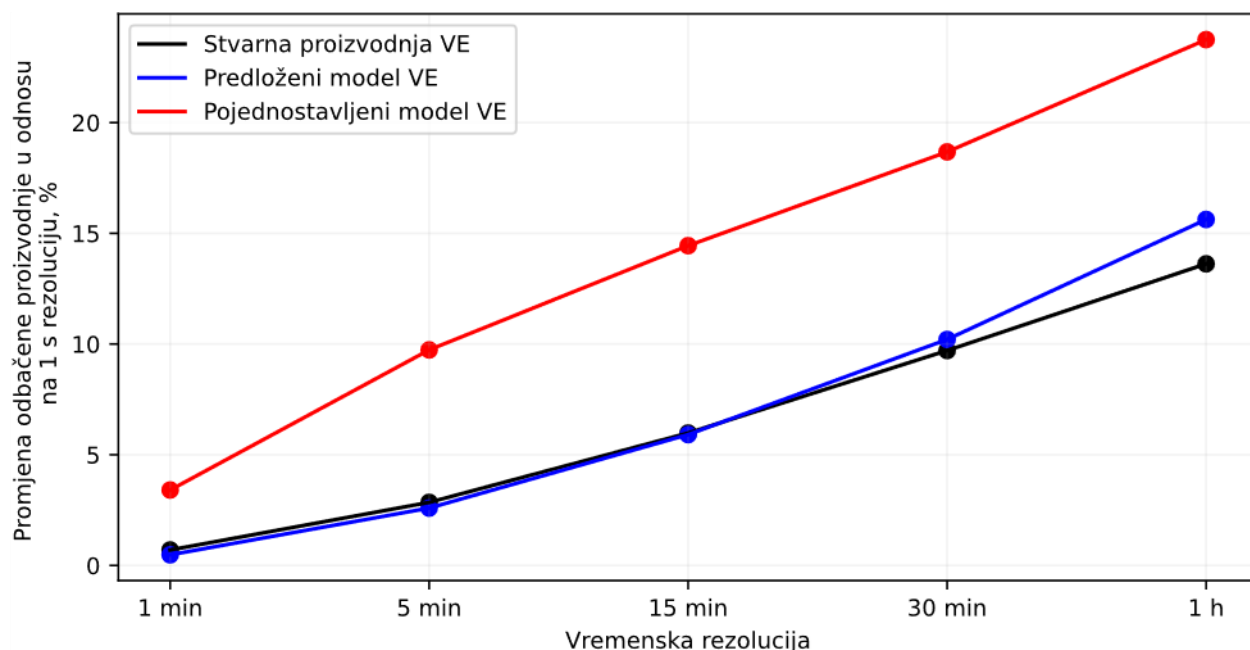


Slika 6-9 Postotna pogreška u odbačenoj proizvodnji kod korištenja predloženog i pojednostavljenog modela VE u odnosu na stvarnu proizvodnju VE pri različitim vremenskim rezolucijama

Potrebno je napomenuti da ovako računata pogreška nije nužno relevantna za procjenu preciznosti modela jer ne uzima u obzir pojedine operativne specifičnosti rada VE. Naime, razlike u proizvodnji VE dobivene korištenjem stvarnih podataka i modela VE mogu biti posljedica npr. neraspoloživosti pojedinih VA ili nedostupnosti podataka za vjetroagregate koji su uključeni u analizu. Slično vrijedi i za odabrani reprezentativni VA. Takve operativne specifičnosti mogu uzrokovati razlike u proizvodnji i posljedično iznosu odbačene proizvodnje.

Relevantniji podatak za procjenu preciznosti modela VE je preciznost procjene dodatne odbačene proizvodnje, odnosno postotnih razlika u odbačenoj proizvodnji pri različitim vremenskim rezolucijama. U tu svrhu, na slici 6-10 prikazana je postotna promjena odbačene proizvodnje računate u 1 min, 5 min, 15 min, 30 min i 1 h rezoluciji u odnosu na 1 s rezoluciju. Postotna promjena prikazana je pojedinačno za svaku varijantu korištenog vremenskog niza za VE.

Sada je primjetno da su razlike u procijenjenoj odbačenoj proizvodnji između različitih rezolucija, računate uz primjenu predloženog modela i stvarne proizvodnje VE, značajno manje. Najveća razlika u navedenim varijantama je između 1 s i 1 h rezolucije, gdje kod primjene stvarne proizvodnje VE razlika iznosi 13,6%, dok kod predloženog modela VE iznosi 15,6%. Razlike između 1 s i 1 min, 5 min ili 15 min rezolucija su praktički beznačajne. Međutim, kod pojednostavljenog modela razlike između 1 s rezolucije i drugih vremenskih rezolucija su značajno veće, upravo zbog pretpostavke linearnog povećavanja fluktuacija.



Slika 6-10 Postotno povećanje odbačene proizvodnje u odnosu na 1 s rezoluciju kod primjene stvarne proizvodnje, predloženog i pojednostavljenog modela VE

Iz prethodnih razmatranja moguće je zaključiti da:

- primjena pojednostavljenog modela VE unosi značajnu pogrešku u rezultate proračuna odbačene proizvodnje pri različitim rezolucijama;
- predloženi model VE može unijeti odgovarajuću pogrešku u proračunu odbačene proizvodnje (značajno manju nego pojednostavljeni model), a pogreška će ovisiti o odstupanju odabranog reprezentativnog VA i ostvarene proizvodnje koja je primarno posljedica odgovarajućih operativnih specifičnosti;

- postoji dobro preklapanje između postotnog povećanja odbačene proizvodnje računate u 1 s rezoluciji i pri nižim rezolucijama ako se proračun odbačene proizvodnje napravi s ostvarenom proizvodnjom VE i predloženim modelom.

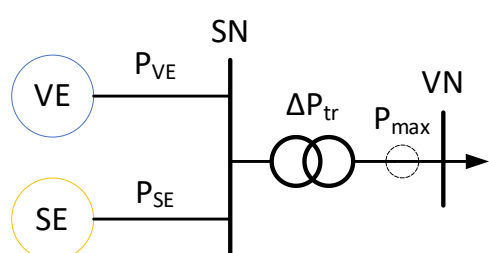
Dakle, iako se primjenom predloženog modela VE iznosi odbačene proizvodnje mogu nešto razlikovati u odnosu na slučaj primjene stvarne proizvodnje, relativna promjena odbačene proizvodnje između različitih vremenskih rezolucija je vrlo slična.

6.2.3 Razmatrani pristup analizi s obzirom na mogućnost formiranja hibridne elektrane

Analiza odbačene proizvodnje u hibridnim elektranama, koje se sastoje od VE i SE, može se razmatrati s obzirom na dvije mogućnosti formiranja hibridnih elektrana:

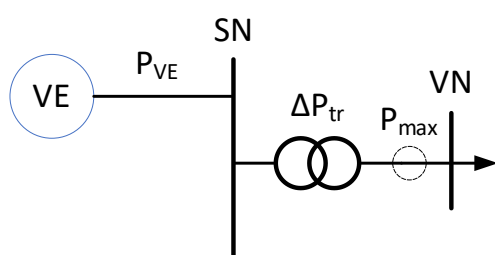
- Varijanta 1): Izgradnjom nove VE i SE na istoj ili bliskoj lokaciji sa zajedničkim mjestom priključka na mrežu,
- Varijanta 2): Proširenjem, odnosno hibridizacijom postojeće VE s novom SE, uz priključenje SE na postojeće mjesto priključka.

Pojednostavljeni prikaz navedenih varijanti prikazan je na slici 6-11. Potrebno je napomenuti da je moguće razmatrati i treću varijantu u kojoj se postojeća SE proširuje s VE, koja je u praksi rjeđa s obzirom da lokacije na kojima su sagrađene postojeće SE obično nisu prikladne za iskorištavanje vjetropotencijala. Iz navedenog razloga, takva varijanta u nastavku nije analizirana.



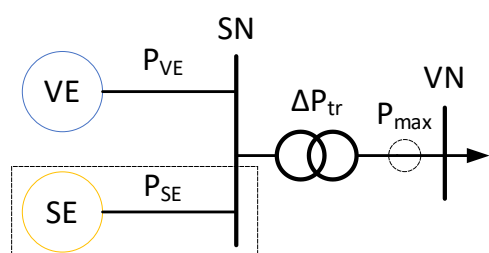
Varijanta 1)

Razmatraju se jednake instalirane snage VE i SE (najmanja odbačena proizvodnja), a priključna snaga se mijenja u rasponu od 50% do 90% instalirane snage hibridne elektrane.



Varijanta 2)

Prije proširenja, priključna snaga je otprilike jednaka instaliranoj snazi VE. Hibridizacija sa SE radi se instaliranom snagom SE u rasponu od 10% do 100% instalirane snage VE, bez promjene priključne snage.



Slika 6-11 Razmatrane varijante analize odbačene proizvodnje

U varijanti 1), kada se gradi nova hibridna elektrana, obično se omjer VE/SE odabire na način da se ostvari minimum odbačene proizvodnje, što prema analizama iz poglavlja 4 rezultira odabirom 40% – 70% udjela

SE u hibridnoj elektrani, neovisno o omjeru priključne snage i instalirane snage hibridne elektrane. Međutim, u varijanti 2), budući da je priključna snaga već prilagođena instaliranoj snazi VE (npr. jednaka instaliranoj snazi VE), obično nije ekonomski opravdano ciljati jednaki udio SE u novoformiranoj hibridnoj elektrani. Stoga se u varijanti 2) instalirana snaga SE mijenja od 10% do 100% instalirane snage VE (omjer SE/VE između 0,1 – 1,0).

6.3 Analiza odbačene proizvodnje kod izgradnje nove hibridne elektrane

6.3.1 Provedba analize odbačene proizvodnje

Analiza odbačene proizvodnje pri visokim vremenskim rezolucijama provodi se uz razmatranje glavnih utjecajnih faktora. Odbačena proizvodnja u hibridnim elektranama primarno ovisi o omjeru instalirane snage VE/SE, odnosu priključne i instalirane snage, veličini hibridne elektrane i klimatskim uvjetima. Analiza odbačene proizvodnje u ovom poglavlju provodi se:

- Ispitivanjem odbačene proizvodnje pri različitim vremenskim rezolucijama za odabranu instaliranu snagu VE i SE, uz nepromijenjeni omjer instalirane snage VE/SE i priključne/instalirane snage. Analiza će se provesti na (i) kvartalnoj razini s ciljem ispitivanja utjecaja različitih sezonskih razdoblja na odbačenu proizvodnju i (ii) godišnjoj razini.
- Ispitivanjem utjecaja veličine elektrane na razlike u odbačenoj proizvodnji promjenom instalirane snage VE i SE, uz nepromijenjeni omjer instalirane snage VE/SE i priključne/instalirane snage. Cilj ovog ispitivanja je utvrditi utjecaj veličine VE i SE na promjene u odbačenoj proizvodnji kao posljedica smanjenja fluktuacija snage zbog efekta poravnanja, tj. smanjena fluktuacija snage VE i SE kod većih u odnosu na manje instalirane snage.
- Ispitivanjem omjera priključne/instalirane snage hibridne elektrane, uz isti omjer VE/SE te odabrane varijante instalirane snage VE i SE.

Četvrti važan faktor koji utječe na odbačenu proizvodnju je omjer instalirane snage VE i SE. Sukladno rezultatima analize iz poglavlja 4 i radu [17], ispitivanja odbačene proizvodnje provest će se najprije pri jednakom omjeru VE i SE u hibridnoj elektrani. Utjecaj različitih omjera VE i SE na odbačenu proizvodnju detaljnije je razmotren u potpoglavlju 6.4 iz aspekta hibridizacije postojeće VE s novom SE.

U analizi odbačene proizvodnje zbog ograničene priključne snage u hibridnim elektranama ispituju se različite instalirane snage VE i SE, što s obzirom na razmatranu topologiju utječe i na odabir nazivne snage transformatora i ostalih parametara nužnih za procjenu gubitaka radne snage u transformatoru. Proračun gubitaka radne snage u transformatoru je proveden primjenom grube procjene njegovih parametara, kako slijedi:

- nazivna snaga transformatora odgovara 110% priključne snage,
- nazivni gubici u bakru uzeti su kao 0,1% nazivne snage transformatora,
- gubici u praznom hodu odgovaraju 20% vrijednosti nazivnih gubitaka u bakru.

Iako se radi o gruboj procjeni parametara, korištena procjena nema značajnijeg utjecaja na rezultate proračuna odbačene proizvodnje, a osobito na razliku između odbačene proizvodnje pri različitim vremenskim rezolucijama.

6.3.2 Utjecaj vremenske rezolucije na procjenu odbačene proizvodnje

Vremenska rezolucija izlazne radne snage VE i SE, kao što je prethodno navedeno, utječe na procjenu odbačene proizvodnje jer se korištenjem nižih rezolucija izostavlja informacija o fluktuacijama snage unutar intervala usrednjenja, a time zanemaruju potencijalna prekoračenja priključne snage.

Utjecaj vremenske rezolucije na procjenu odbačene proizvodnje provodi se korištenjem 1 s rezolucije izlazne snage hibridne elektrane te njenim usrednjenjem do uključivo 1 h rezolucije prema postupku navedenom u potpoglavlju 6.2.1.

Analiza odbačene proizvodnje provedena je na odabranoj hibridnoj elektrani instalirane snage VE 25,6 MW (osam VA nazivne snage 3200 kW) i instalirane snage SE 25,6 MWp (u nastavku: 25,6 MW/25,6 MWp). Instalirana snaga hibridne elektrane P^{hpp} jednaka je zbroju instalirane snage VE i SE, $P^{hpp}=51,2$ MW. Omjer priključne i instalirane snage hibridne elektrane u ovom slučaju fiksira se na 70%, što znači da je priključna snaga:

$$P^{max} = 0,7 \cdot P^{hpp} = 0,7 \cdot 51,2 \text{ MW} = 35,7 \text{ MW} \quad (6.2)$$

Odabrani omjer priključne i instalirane snage od 70% znači da je instalirana snaga hibridne elektrane predimenzionirana za cca 43% u odnosu na priključnu snagu, a pri navedenoj razini apriori je utvrđeno da je iznos odbačene proizvodnje i dalje u razumnim granicama, tj. značajno manji od 5% ukupne proizvodnje, promatrano u 1 h rezoluciji.

Odbačena proizvodnja najprije je razmatrana grupirano na kvartalnoj razini, odnosno grupiranjem mjeseci u zimske (siječanj, veljača), proljetne (ožujak, travanj, svibanj), ljetne (lipanj, srpanj, kolovoz) i jesenske (rujan, listopad, studeni) mjeseci. Prosinac nije uključen u razmatranje. Analiza odbačene proizvodnje tijekom duljih vremenskih perioda daje pouzdanije rezultate i smanjuje vjerojatnost utjecaja pojedinih događaja.

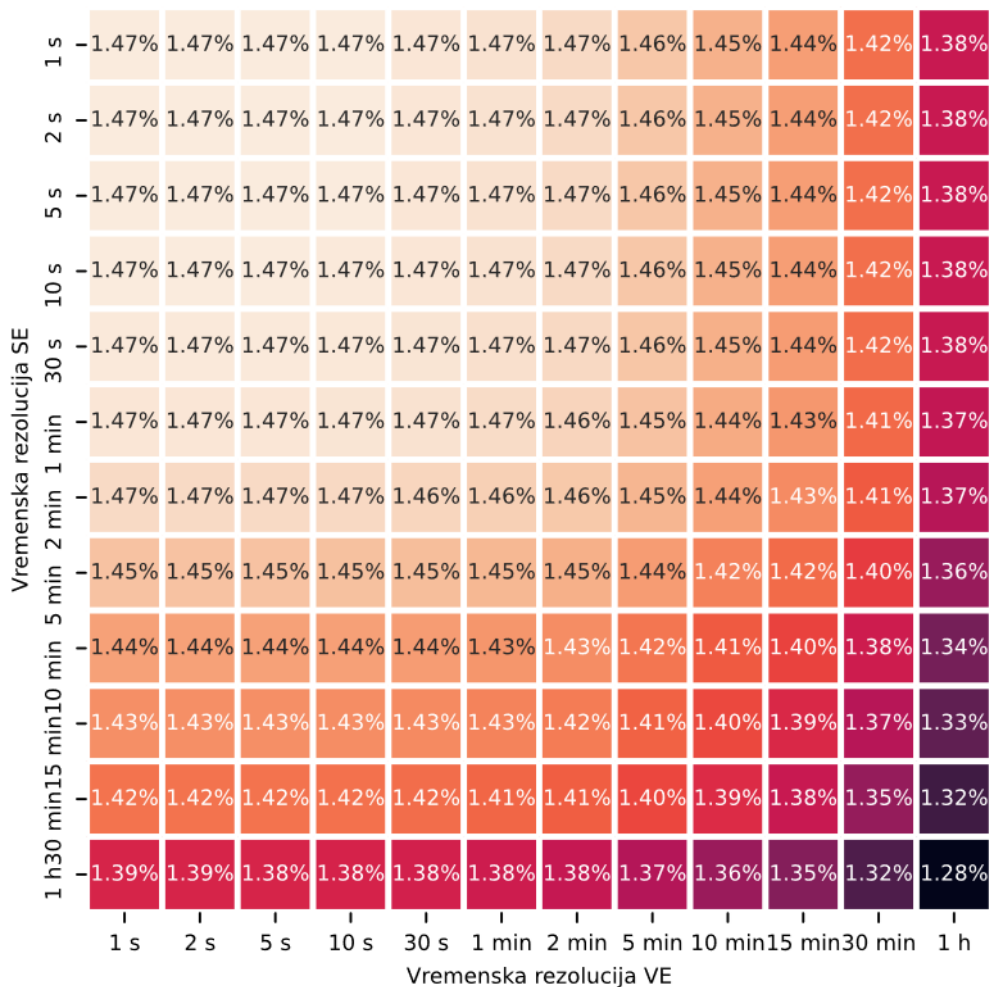
6.3.2.1 Kvartalna analiza odbačene proizvodnje

Na slici 6-12 prikazana je odbačena proizvodnja u razmatranoj hibridnoj elektrani pri različitim vremenskim rezolucijama za tromjesečni period od ožujka do svibnja, izražena u postocima ukupne proizvodnje hibridne elektrane. Odbačena proizvodnja prikazana je za sve moguće kombinacije korištenih vremenskih rezolucija VE i SE, uključujući i primjenu različitih vremenskih rezolucija VE i SE (npr. 10 min za VE i 1 h za SE) prema metodi opisanoj u potpoglavlju 6.2.1.

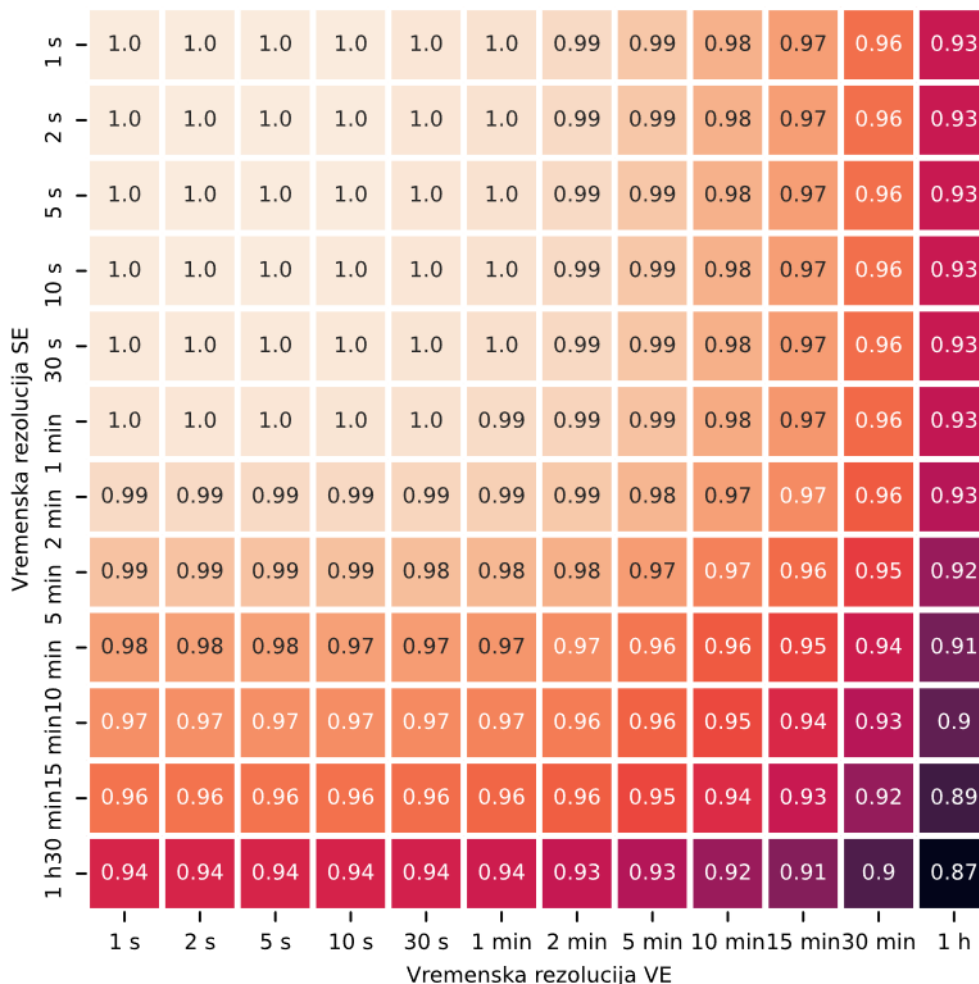
Iz dobivenih rezultata primjećuje se najprije da u ovoj varijanti korištenje više vremenske rezolucije u odnosu na 1 min ne povećava preciznost u procjeni odbačene proizvodnje. Odbačena proizvodnja procijenjena u 1 min rezoluciji iznosi 1,47% ukupne proizvodnje i može se smatrati dovoljno preciznom da reprezentira stvarnu odbačenu proizvodnju. Korištenjem nižih vremenskih rezolucija u odnosu na 1 min postupno se smanjuje preciznost u procjeni odbačene proizvodnje. Tako pri 1 h rezoluciji odbačena proizvodnja iznosi 1,28% ukupne proizvodnje, što je 87% stvarnih gubitaka. Dakle, pogreška u procjeni gubitaka korištenjem 1 h rezolucije u ovom slučaju iznosi 13%.

Na slici 6-13 prikazane su relativne vrijednosti odbačene proizvodnje pri odgovarajućoj kombinaciji vremenske rezolucije VE i SE, u odnosu na 1 s rezoluciju VE i SE. Ovakav prikaz omogućava jednostavniju usporedbu odbačene proizvodnje između različitih vremenskih rezolucija.

Primjetno je i da korištenjem 15 min rezolucije moguće značajnije poboljšanje preciznosti procjene u odnosu na 1 h rezoluciju. Odbačena proizvodnja procijenjena u 15 min rezoluciji je 8,5% veća u odnosu na 1 h rezoluciju, a korištenjem 15 min rezolucije pogreška u procjeni se smanjuje na 6% (u odnosu na 13% kod 1 h rezolucije).



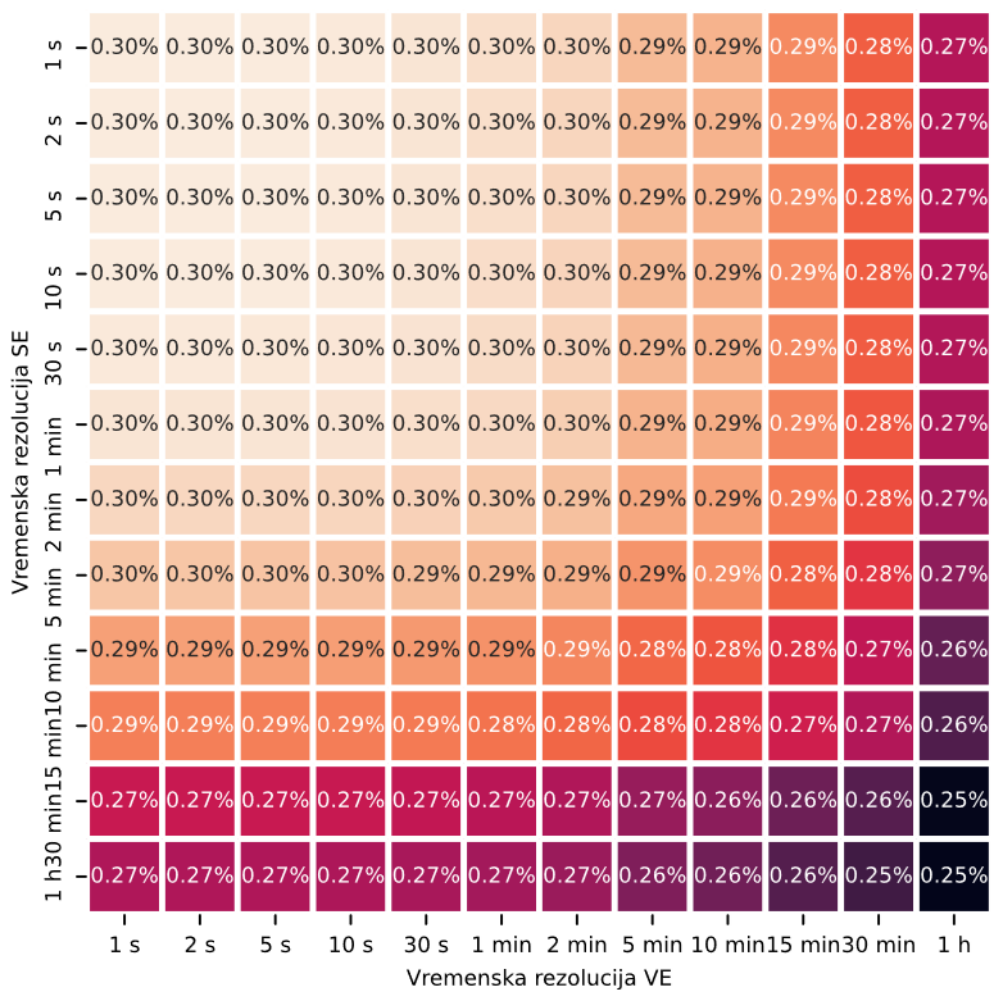
Slika 6-12 Odbačena proizvodnja pri različitim vremenskim rezolucijama u hibridnoj elektrani instalirane snage 25,6 MW/25,6 MWp i priključnoj snazi 35,7 MW (period od početka ožujka do kraja svibnja)



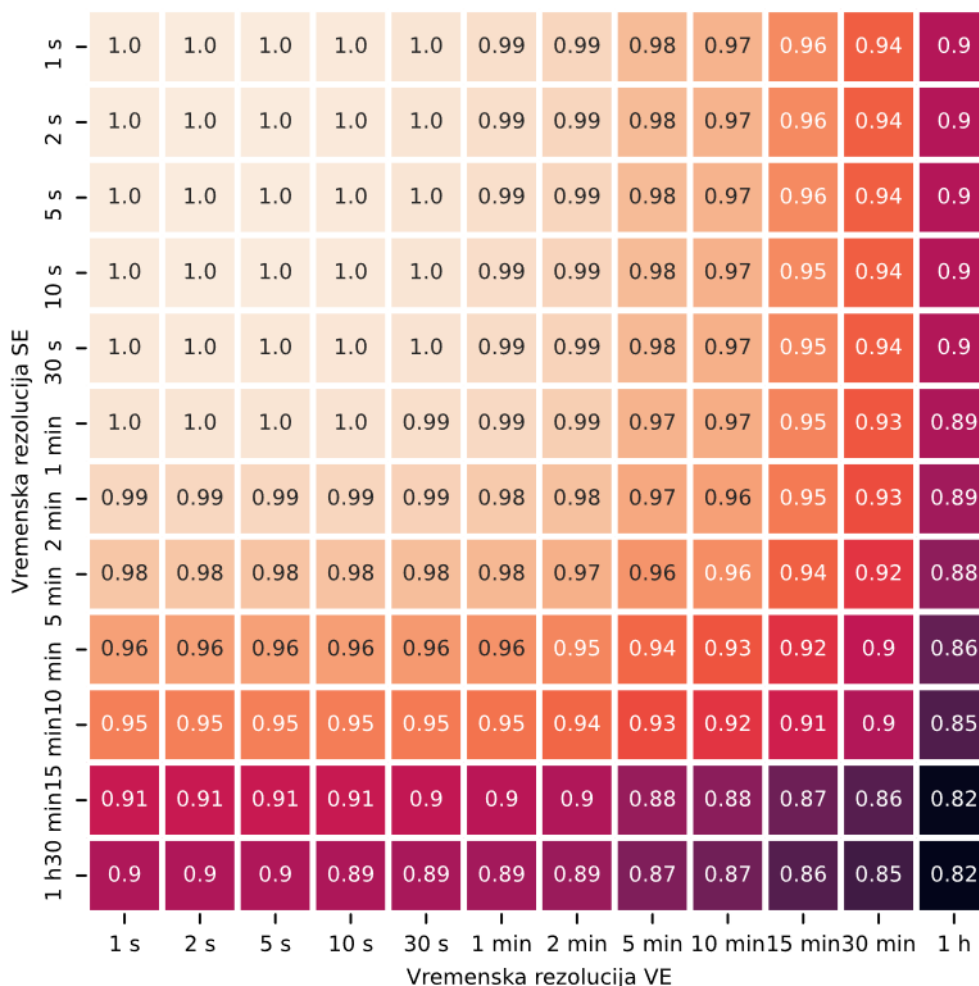
Slika 6-13 Relativne vrijednosti odbačene proizvodnje u odnosu na 1 s rezoluciju VE i SE (period od početka ožujka do kraja svibnja)

Isti prikaz odbačene proizvodnje za ljetni period, od početka lipnja do kraja kolovoza, prikazan je na slikama 6-14 i 6-15. Uočava se značajno smanjenje iznosa odbačene proizvodnje zbog manje učestalosti vjetra tijekom ljetnih mjeseci. Iako je iznos odbačene proizvodnje značajno drukčiji u odnosu na proljetni period, razlike u odbačenoj proizvodnji nisu bitno različite. Postotna pogreška u procjeni odbačene proizvodnje kod 1 h rezolucije, u odnosu na 1 s rezoluciji, iznosi 18% (tj. procjenom odbačene proizvodnje u 1 h rezoluciji dobiva se 82% iznosa stvarne odbačene proizvodnje). Pri 15 min rezoluciji ista pogreška iznosi 9%.

Analiza odbačene proizvodnje na preostalim periodima prikazana je u prilogu B (siječanj i veljača) i prilogu C (od rujna do studenog). Tablica 6-2 prikazuje usporedbu odbačene proizvodnje u svim periodima. Iako mogu postojati značajne varijacije odbačene proizvodnje (npr. ljeti je odbačena proizvodnja značajno manja), varijacije postotnih razlika između 15 min i 1 s, te 1 h i 1 s rezolucija su značajno manje.



Slika 6-14 Odbačena proizvodnja pri različitim vremenskim rezolucijama u hibridnoj elektrani instalirane snage 25,6 MW/25,6 MWp i priključnoj snazi 35,7 MW (ljetni period od početka lipnja do kraja kolovoza)



Slika 6-15 Relativne vrijednosti odbačene proizvodnje u odnosu na 1 s rezoluciju VE i SE (ljetni period od početka lipnja do kraja kolovoza)

Tablica 6-2 Odbačena proizvodnja po promatranim razdobljima i usporedba 15 min i 1 h rezolucije u odnosu na 1 s rezoluciju

Period	1 s	15 min	1 h	15 min/1 s (%)	1 h/1 s (%)
siječanj i veljača	1,36%	1,29%	1,12%	94,9%	82,4%
ožujak – svibanj	1,47%	1,39%	1,28%	94,6%	87,1%
lipanj – kolovoz	0,30%	0,27%	0,25%	90,0%	83,3%
rujan – studeni	1,02%	0,96%	0,85%	94,1%	83,3%

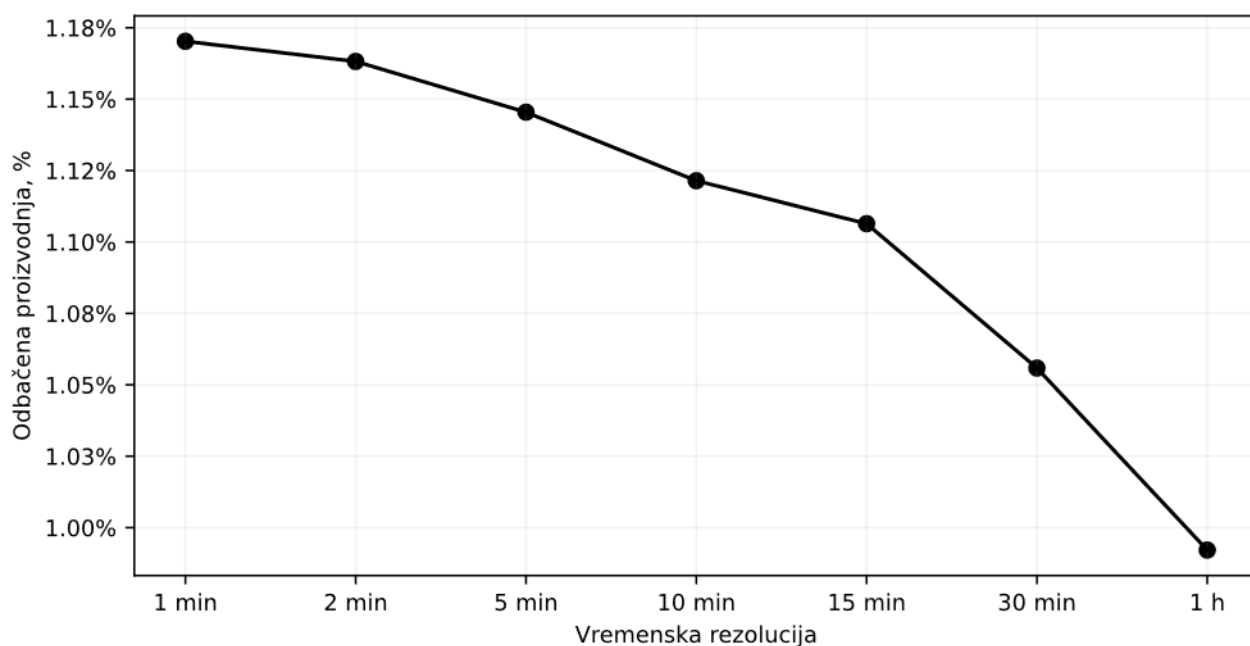
Potrebno je napomenuti da se dobivene vrijednosti odnose na konkretnu hibridnu elektranu instalirane snage 25,6 MW/25,6 MWp s omjerom priključne/instalirane snage 70%. Promjene veličine hibridne elektrane, omjera priključne/instalirane snage te omjera instalirane snage VE/SE uzrokovat će određene promjene u procjeni odbačene proizvodnje. Primjerice, povećanje veličine hibridne elektrane uzrokovati će smanjenje fluktuacija izlazne snage, što će smanjiti i razlike u odbačenoj proizvodnji procijenjenoj pri različitim vremenskim rezolucijama. Utjecaj spomenutih parametara razmotrit će se u sljedećim potpoglavljima.

6.3.2.2 Cjelogodišnja analiza odbačene proizvodnje

Analiza odbačene proizvodnje tijekom jedne godine napravljena je uz iste ulazne podatke i pretpostavke kao i u prethodnom potpoglavlju. Proračun je proveden na način da su generirane vremenske serije proizvodnje VE i SE u 1 s rezoluciji primjenom modela, a potom su iste usrednjene na 1 min rezoluciju. Iz rezultata prethodnog potpoglavlja, uočeno je da su dodatni iznosi odbačene proizvodnje pri vremenskim intervalima kraćim od 1 min praktično isti kao i kod 1 min (za odabrane instalirane snage VE i SE). Iz istog razloga, 1 min rezolucija se može koristiti kao osnova za daljnju usporedbu odbačene proizvodnje.

Rezultati proračuna odbačene proizvodnje prikazani su na slici 6-16. Odbačena proizvodnja prikazana je u postotnom iznosu u odnosu na ukupnu proizvodnju VE + SE na pragu mreže. Iz rezultata se može uočiti da je odbačena proizvodnja računata u 1 h rezoluciji iznosi 0,99%, dok u 1 min rezoluciji iznosi 1,17%. Dakle, pogreška u procjeni iznosi cca 15% kod primjene 1 h rezolucije, ako se pretpostavi da 1 min rezolucija daje stvarnu odbačenu proizvodnju. Navedeno je u skladu i s rezultatima dobivenim na kvartalnoj razini.

Najveća strmina pada javlja se pri rezolucijama duljim od 15 min, gdje se daljnjim smanjenjem vremenske rezolucije može očekivati značajnije povećanje odbačene proizvodnje. Preciznija procjena može se dobiti kada se koristi npr. 10 min rezolucija, gdje je pogreška u procjeni manja od 5% iznosa odbačene proizvodnje dobivene korištenjem 1 min rezolucije.



Slika 6-16 Postotni iznos ukupne odbačene proizvodnje tijekom cijele godine za raspon vremenskih rezolucija 1 min – 1 h s naznačenim postotnim smanjenjem u odnosu na odbačenu proizvodnju u 1 min rezoluciji

6.3.3 Utjecaj veličine VE i SE

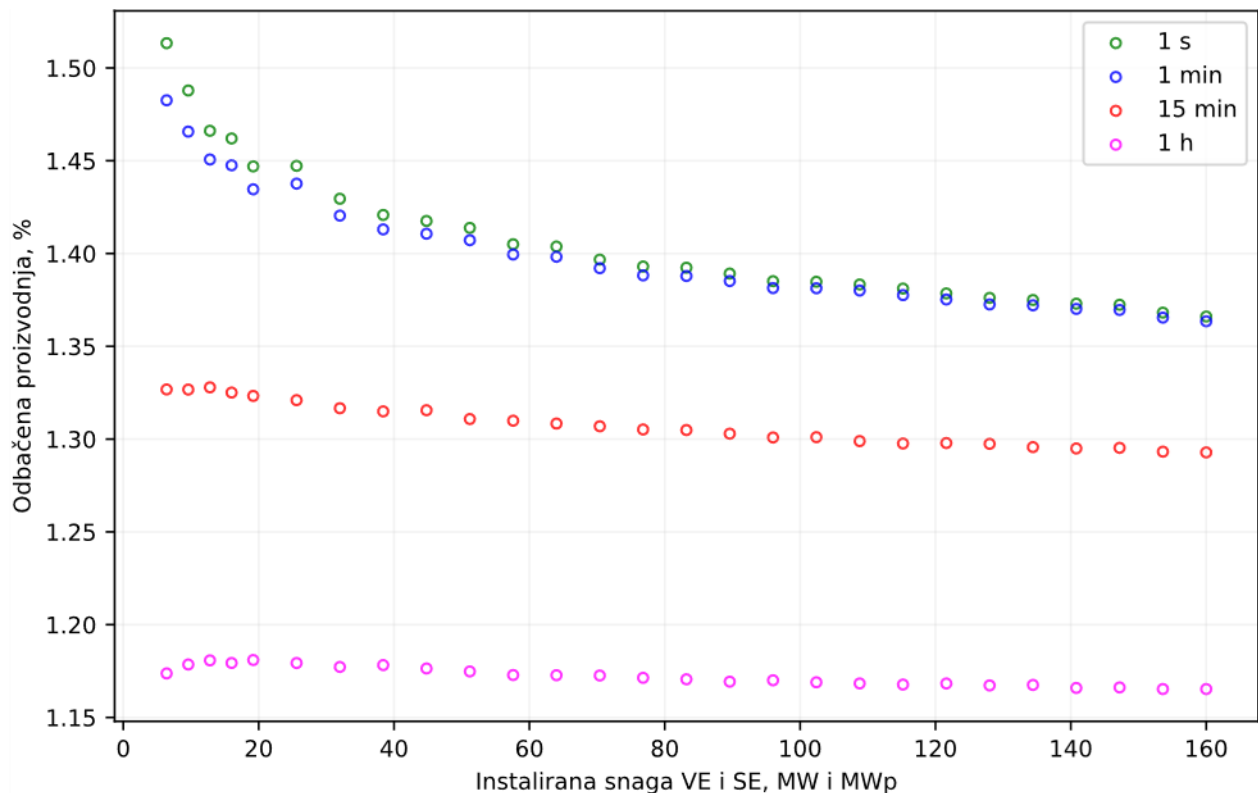
Veličina VE i SE je važan faktor za razmatranje odbačene proizvodnje pri višim vremenskim rezolucijama. Pod veličinom VE i SE se uobičajeno podrazumijeva broj VA u VE i površina, odnosno broj FN modula, kod SE. U nastavku će se pod veličinom podrazumijevati i instalirana snage VE i SE jer je ista direktno vezana za broj VA ili broj FN modula.

Povećanje instalirane snage VE i SE uzrokuje smanjenje fluktuacija izlazne snage. Dodatna odbačena proizvodnja, npr. mjerena u 1 s rezoluciji u odnosu na 1 h usrednjenju rezoluciju, direktna je posljedica fluktuacija snage unutar intervala usrednjenja. Iz istog razloga smanjenje fluktuacija zbog veličine (tj. efekta poravnanja) uzrokuje smanjenje dodatne odbačene proizvodnje. Za ispravnu provedbu analize utjecaja veličine VE i SE na promjene odbačene proizvodnje, potrebno je koristiti adekvatnu vremensku rezoluciju s kojom je moguće zabilježiti fluktuacije snage u proizvodnji VE i SE.

Korištenjem VA nazivne snage 3,2 MW, proizvodnja VE različitih instaliranih snaga generirana je korištenjem modela VE u potpoglavlju 5.4. Nazivna radna snaga VE generirana je s parnim višekratnicima broja VA, počevši od dva VA (6,4 MW) do 50 VA (160 MW), tj. 6,4 MW, 12,8 MW, ..., 160 MW. Instalirana snaga SE u svakoj razmatranoj varijanti jednaka je nazivnoj snazi VE, dok omjer priključne i instalirane snage hibridne elektrane iznosi 70% u svim varijantama.

Utjecaj instalirane snage VE i SE na odbačenu proizvodnju pri različitim vremenskim rezolucijama prikazan je na slici 6-17, pri čemu je razmatran kraći vremenski period od mjesec dana. Ispitivanje je napravljeno za 1 h, 15 min, 1 min i 1 s rezoluciju. Kao što je i očekivano, promjene odbačene proizvodnje kod 1 h rezolucije pri povećanju instalirane snage VE i SE nisu primjetne. Kod 15 min rezolucije primjećuje se blago opadajući trend odbačene proizvodnje s povećanjem instalirane snage VE i SE. Ovakav rezultat može se obrazložiti činjenicom da je efekt poravnanja izraženiji kod 15 min u odnosu na 1 h rezoluciju.

Primjenom viših vremenskih rezolucija uočava se značajnije povećanje odbačene proizvodnje pri manjim instaliranim snagama. Navedeni rezultat izražava važnost razmatranja veličine VE i SE, odnosno efekta poravnanja kod primijene viših vremenskih rezolucija. Dok su razlike u procijenjenoj odbačenoj proizvodnji između 1 s i 1 min rezolucije kod VE i SE većih instaliranih snaga praktično zanemarive, iste postaju nešto izraženije kod VE i SE instaliranih snaga manjih od 10 MW/10 MWp. Razlike između 1 s i 1 min rezolucije kod hibridnih elektrana manjih instaliranih snaga neće se detaljnije razmatrati u nastavku.



Slika 6-17 Utjecaj instalirane snage VE i SE na odbačenu proizvodnju pri različitim vremenskim rezolucijama za travanj 2021.

Detaljniji odnosi odbačene proizvodnje procijenjene pri različitim vremenskim rezolucijama za četiri veličine hibridne elektrane prikazani su na slici 6-18. Rezultati su dobiveni na osnovu proračuna u periodu od početka ožujka do kraja svibnja.

Odbačena proizvodnja računata u 1 h rezoluciji praktički se ne mijenja značajno s obzirom na instaliranu snagu hibridne elektrane. Korištenjem viših vremenskih rezolucija razlike u odbačenoj proizvodnji postaju očitije, što je i očekivano s obzirom na efekt poravnanja čiji utjecaj postaje značajniji. Iz navedenog proizlazi da će razlike između procijenjene odbačene proizvodnje u nižim vremenskim rezolucijama i stvarne odbačene proizvodnje biti to značajnije što je instalirana snaga VE i SE manja.

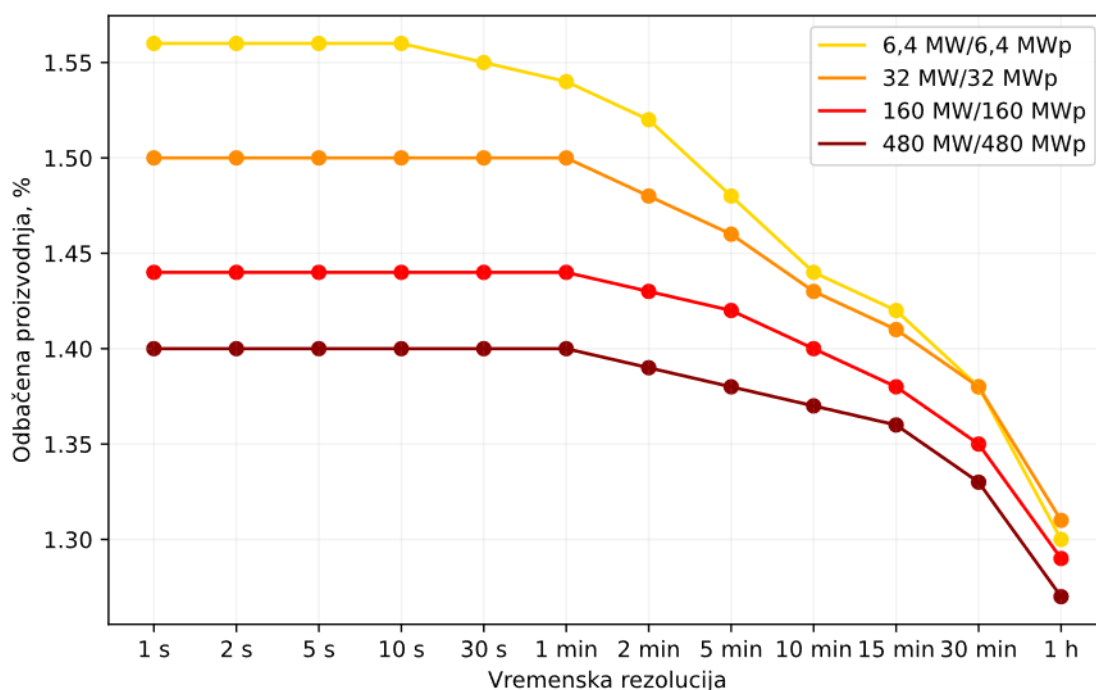
Ako se odbačena proizvodnja u 1 s rezoluciji definira kao stvarna odbačena proizvodnja, iz rezultata sa slike 6-18 može se istaknuti sljedeće:

- Stvarna odbačena proizvodnja kod najmanje razmatrane hibridne elektrane 6,4 MW/6,4 MWp je 20,0% veća u odnosu na procjenu u 1 h rezoluciji te 9,9% veća u odnosu na 15 min rezoluciju. Izraženo na drugi način, procjenom u 1 h rezoluciji moguće je uočiti 83,3% stvarne odbačene proizvodnje, odnosno 91,0% u 15 min rezoluciji.
- Kod najveće razmatrane hibridne elektrane 480 MW/480 MWp stvarna odbačena proizvodnja je 11% veća u odnosu na 1 h te 2,9% veća u odnosu na 15 min rezoluciju. Navedeno rezultira 1 h procjenom u iznosu 90,0% stvarne odbačene proizvodnje, odnosno 97,1% u 15 min rezoluciji.

Na temelju rezultata, zaključuje se da:

- pri proračunu odbačene proizvodnje u npr. 1 h rezoluciji veličina VE i SE nema utjecaja na rezultate proračuna, tj. moguće je skalirati proizvodnju elektrane bez promjene odbačene proizvodnje,

- korištenjem 10 min i 15 min rezolucije, veličina VE i SE ima manji utjecaj na rezultate te skaliranje proizvodnje neće značajno utjecati na rezultate odbačene proizvodnje,
- kod viših vremenskih rezolucija, poput 5 min ili viših, veličina ima značajan utjecaj na odbačenu proizvodnju te je istu potrebno uzeti u obzir.



Slika 6-18 Ovisnost odbačene proizvodnje o vremenskoj rezoluciji i instaliranoj snazi VE i SE zasnovana na periodu od ožujka do svibnja

6.3.4 Utjecaj omjera priključne i instalirane snage hibridne elektrane

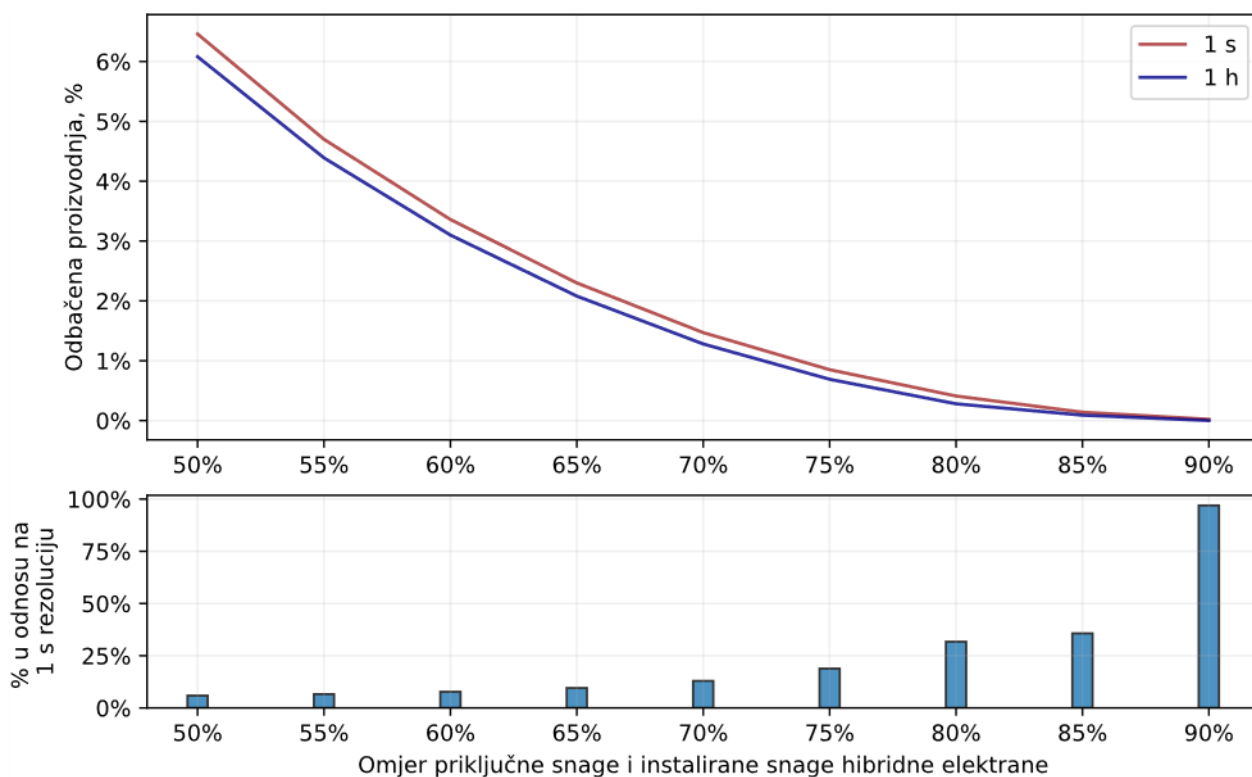
Omjer priključne i instalirane snage hibridne elektrane je jedan od najvažnijih faktora kod razmatranja odbačene proizvodnje u hibridnim elektranama. Ponekad se navedeni omjer razmatra i obratno, tj. kao omjer instalirane i priključne snage, a u tom slučaju poprima vrijednosti ≥ 1 .

Iako ovaj omjer ima značajan utjecaj na iznos odbačene proizvodnje, u postojećim istraživanjima nije ispitano kako će isti utjecati na promjene odbačene proizvodnje pri različitim vremenskim rezolucijama.

U dosadašnjim razmatranjima pretpostavljen je omjer priključne i instalirane snage od 70%. U ovom potpoglavlju, razmatra se odbačena proizvodnja u varijanti jednake instalirane snage VE i SE 25,6 MW/25,6 MWp (isto kao i u potpoglavlju 6.3.2), ali uz promjenu omjera priključne i instalirane snage od 50% do 90% s korakom od 5%. Omjer priključne i instalirane snage između 90% i 100% nije razmatran budući da je odbačena proizvodnja tijekom razmatranog perioda vrlo mala. Također, vrlo je mala vjerojatnost očekivati omjere manje od 50% u praktičnim primjenama zbog izrazito visokih iznosa odbačene proizvodnje.

Odbačena proizvodnja za različite omjere priključne i instalirane snage hibridne elektrane prikazana je na slici 6-19 za 1 s rezoluciju (crveno) i 1 h rezoluciju (plavo) na gornjem grafu, dok je na donjem grafu prikazana postotna razlika odbačene proizvodnje između 1 s rezolucije i 1 h rezolucije (% u odnosu na 1 s rezoluciju). Pri manjim omjerima priključne i instalirane snage, odbačena proizvodnja je većeg iznosa, ali se postotna razlika između 1 s i 1 h rezolucije smanjuje i obratno. Kod omjera $P^{max}/P^{hpp} = 50\%$, odbačena

proizvodnja u 1 s rezoluciji iznosi 6,46%, a u 1 h rezoluciji 6,08%. Postotna razlika u odbačenoj proizvodnji iznosi $(6,46\% - 6,08\%)/6,46\% = 5,9\%$. Povećanjem omjera na $P^{max}/P^{hpp} = 70\%$, odbačena proizvodnja u 1 s rezoluciji iznosi 1,47%, a u 1 h rezoluciji 1,28%, što daje postotno povećanje od 12,9%. U konačnici, kod omjera $P^{max}/P^{hpp} = 85\%$ postotno povećanje iznosi 35,7%, ali je pritom odbačena proizvodnja praktično zanemariva i iznosi 0,14% u 1 s rezoluciji.



Slika 6-19 Ovisnost odbačene proizvodnje kod VE i SE instalirane snage 25,6 MW/25,6 MWp pri različitim omjerima priključne i instalirane snage

6.4 Analiza odbačene proizvodnje kod hibridizacije postojeće VE s novom SE

U prethodnim potpoglavljima razmatrana je izgradnja nove hibridne elektrane sastavljene od VE i SE na istoj ili bliskoj lokaciji sa zajedničkim mjestom priključka. Pri evaluaciji odbačene proizvodnje promatrana je jednaka instalirana snage VE i SE budući da takva varijanta najčešće rezultira minimalnom odbačenom proizvodnjom, neovisno o priključnoj snazi.

Za očekivati je da će se u budućnosti veći broj hibridnih elektrana formirati proširenjem postojećih VE sa novom SE. Navedeni postupak nazivamo hibridizacijom VE sa SE. Iako je moguć i obratan slučaj, tj. proširenje postojeće SE sa novom VE, u praksi je manje vjerojatan i kao takav se neće razmatrati.

Problematiku proširenja postojeće VE sa novom SE najprije je potrebno razmotriti s obzirom na mogućnost povećanja priključne snage prilikom hibridizacije. Priključna snaga može biti fiksirana, tj. ne može se dalje povećavati, ili možda i može, ali je apriori jasno da to financijski ili vremenski nije izvedivo. Na primjer, priključna snaga može biti ograničena zbog kapaciteta postojećeg priključnog voda. Postojeća priključna snaga VE odabrana je s obzirom na instaliranu/vršnu snagu VE, te može biti jednaka ili nešto manja od instalirane snage VE. Ako je zakonodavnim okvirom dopušteno, najčešće je ekonomski opravdano povećanje instalirane snage VE za cca. 10% do 15% u odnosu na priključnu snagu. Kao i kod hibridnih elektrana, u tom slučaju se može očekivati odgovarajući iznos odbačene proizvodnje prije proširenja sa SE.

Zbog komplementarnosti VE i SE, hibridizacijom postojeće VE sa SE značajnije se unaprjeđuju tehnno-ekonomski pokazatelji te je moguće značajnije povećanje ukupnog kapaciteta nego u varijanti dodavanja novih VA.

Analiza odbačene proizvodnje pri hibridizaciji postojeće VE s novom SE provodi se u dvije varijante:

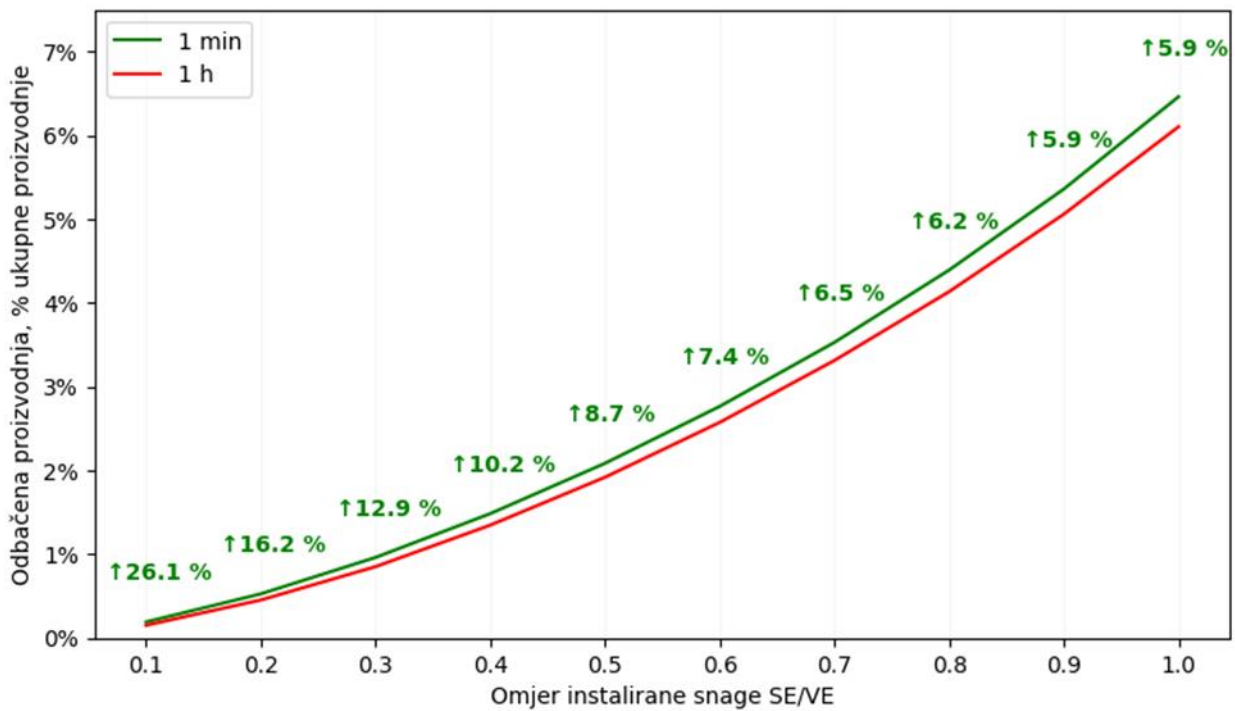
- priključna snaga jednaka je instaliranoj snazi VE,
- priključna snaga jednaka je 90% instalirane snage VE.

Proširenje VE razmatra se uz instalirane snage SE pri omjerima SE/VE između 0,1 i 1,0 s korakom 0,1. U obje varijante priključne snage, odbačena proizvodnja promatra se pri različitim vremenskim rezolucijama, a izražava se u postotnim vrijednostima ukupne proizvodnje hibridne elektrane na pragu mreže. Za instaliranu snagu VE odabire se 32 MW (10 VA nazivne snage 3,2 MW), pri čemu je instalirana snaga SE u rasponu 3,2 MWp – 32 MWp. Za analizu je korišten tromjesečni period od početka ožujka do kraja svibnja.

Na slici 6-20 prikazana je odbačena proizvodnja u 1 min i 1 h rezoluciji u prvoj varijanti (priključna snaga jednaka instaliranoj snazi VE). Postotno povećanje odbačene proizvodnje u 1 min rezoluciji u odnosu 1 h rezoluciju dano je za svaki iznos omjera SE/VE.

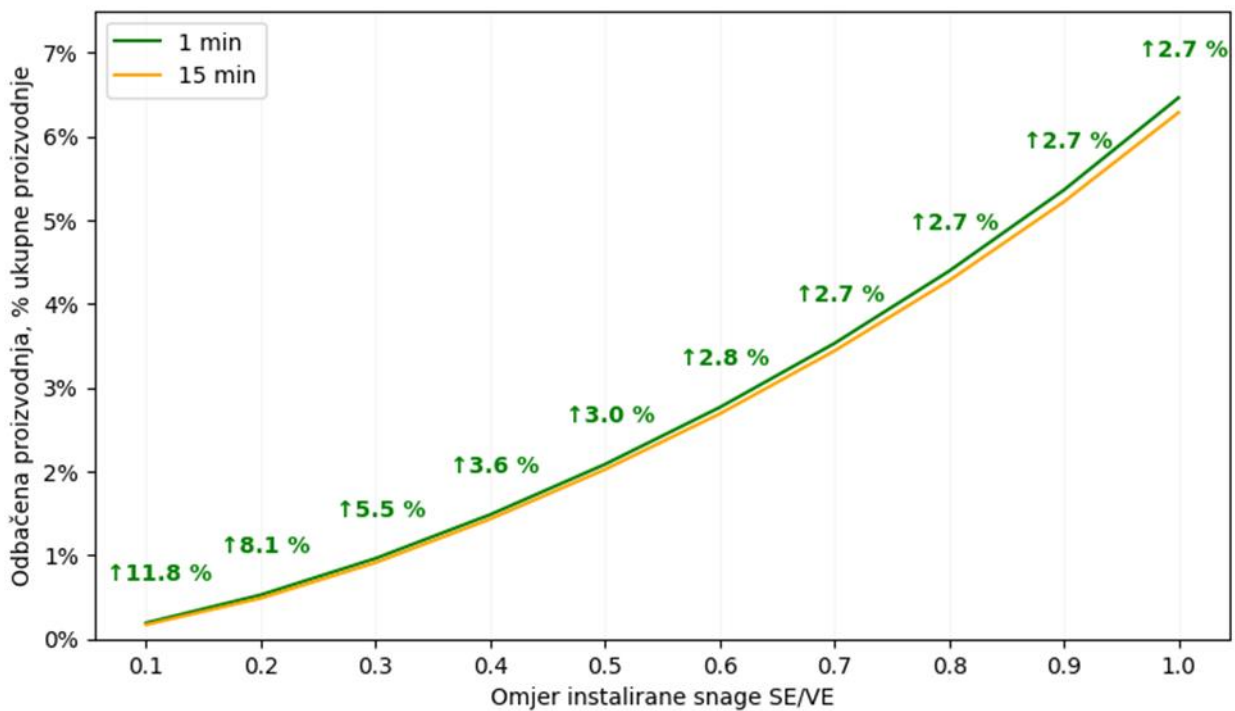
Pri omjeru instalirane snage SE/VE od npr. 0,3 (VE 32 MW i SE 9,6 MWp), što odgovara omjeru $P^{max}/P^{hpp}=77\%$, izračunata odbačena proizvodnja je 12,9% veća kod 1 min rezolucije u odnosu na 1 h rezoluciju. Isto povećanje odbačene proizvodnje se smanjuje na 6,2% kod omjera SE/VE 0,8. Očekivano, odbačena proizvodnja se povećava s povećanjem instalirane snage SE, dok se istovremeno pogreška u procjeni smanjuje. Najveća pogreška u procjeni je pri manjim omjerima SE/VE, što je u skladu s rezultatima iz prethodnog potpoglavlja, odnosno potvrđuje da se dodatni iznos odbačene proizvodnje povećava zbog:

- manje instalirane snage SE i
- većeg omjera P^{max}/P^{hpp} (priključna snaga je nepromijenjena, a instalirana snaga hibridne elektrane se smanjila)



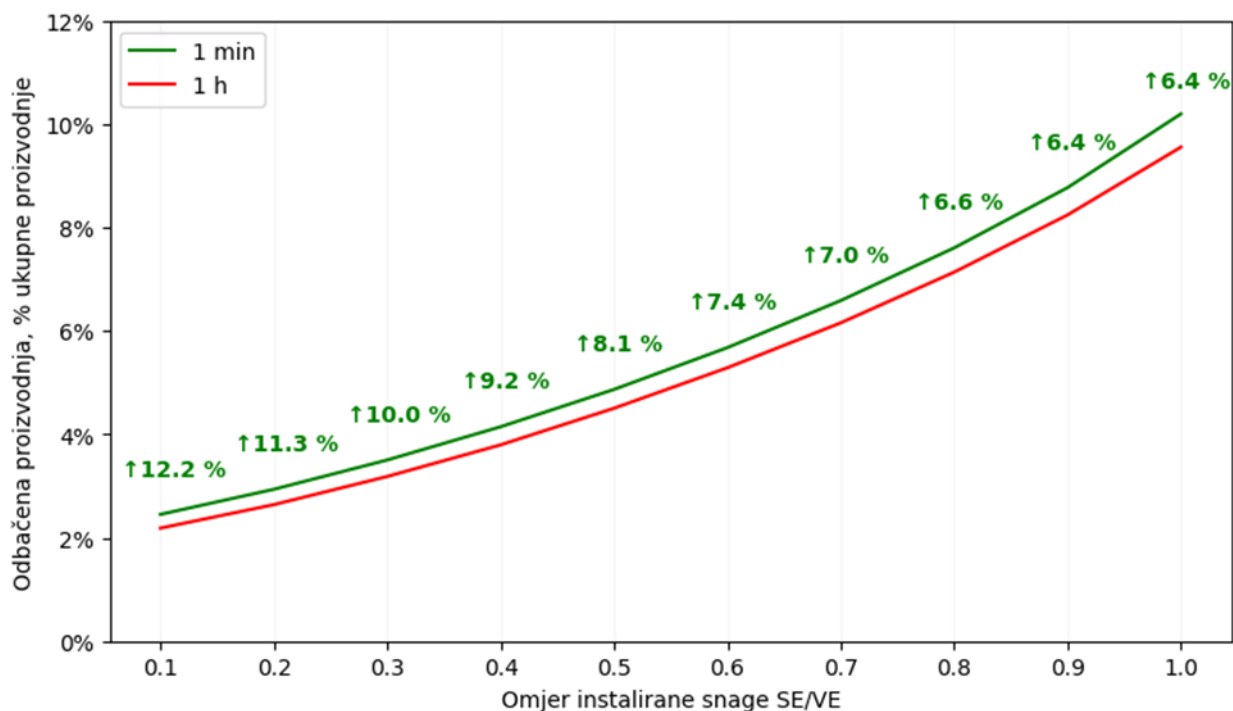
Slika 6-20 Odbačena proizvodnja u % kod proširenja VE sa SE i priključnoj snazi 100% iznosa instalirane snage VE – usporedba 1 min i 1 h rezolucije

Usporedba 1 min i 15 min za istu varijantu kao i u prethodnom slučaju prikazana je na slici 6-21 u nastavku. Primjetno je da se korištenjem 15 min rezolucije procjena odbačene proizvodnje može značajnije poboljšati, tj. da je razlika između 1 min i 15 min odbačene proizvodnje približno dvostruko manja nego između 1 min i 1 h rezolucije.

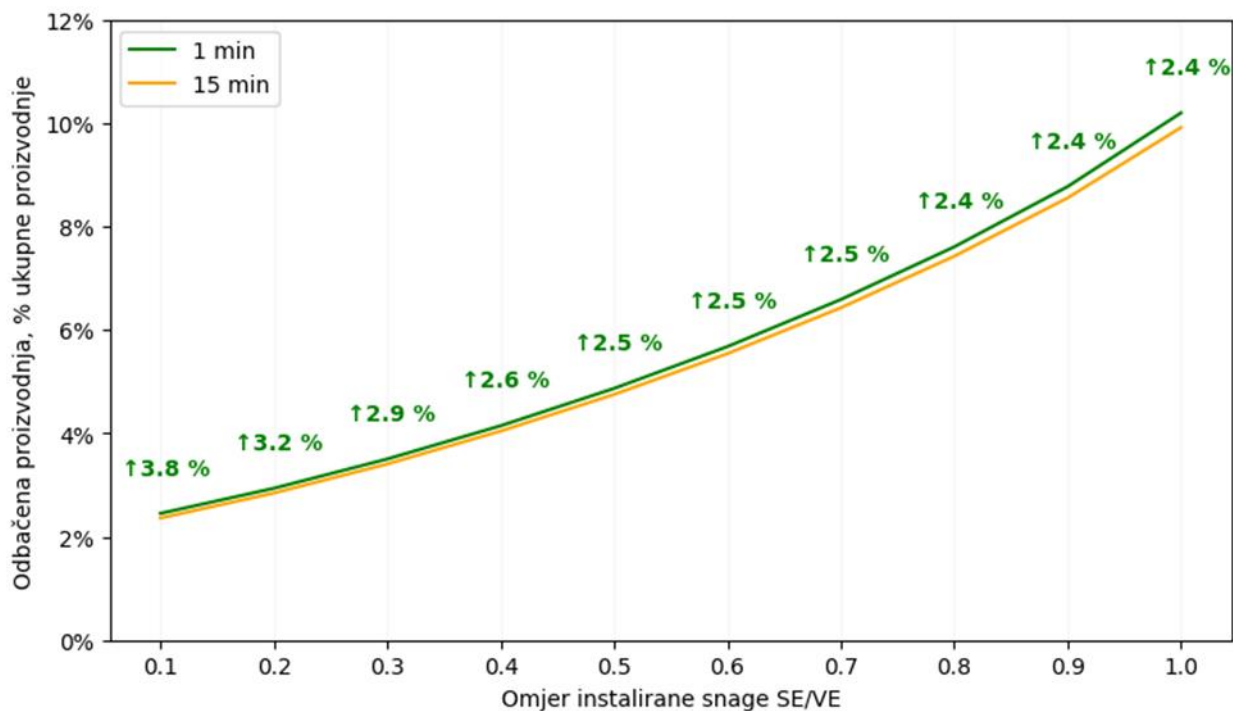


Slika 6-21 Odbačena proizvodnja u % kod proširenja VE sa SE i priključnoj snazi 100% iznosa instalirane snage VE – usporedba 1 min i 15 min rezolucije

Ako se priključna snaga smanji na iznos od 90% instalirane snage VE, dobivaju se rezultati odbačene proizvodnje prema slikama 6-22 i 6-23. U oba slučaja u odnosu na prethodne dvije varijante odbačena proizvodnja je veća, ali se dodatna odbačena proizvodnja smanjuje za svaki omjer SE/VE, što je također sukladno rezultatima potpoglavlja 6.3.4 (smanjenjem priključne snage u odnosu na instaliranu snage VE rezultira manjom dodatnom odbačenom proizvodnjom). Ako se uspoređi odbačena proizvodnja između 1 min i 1 h rezolucije te 1 min i 15 min rezolucije, slijedi da je u ovoj varijanti korištenjem 15 min rezolucije pogreška u procjeni odbačene proizvodnje čak 2,6 – 3,2 puta manja u odnosu na 1 h rezoluciju.

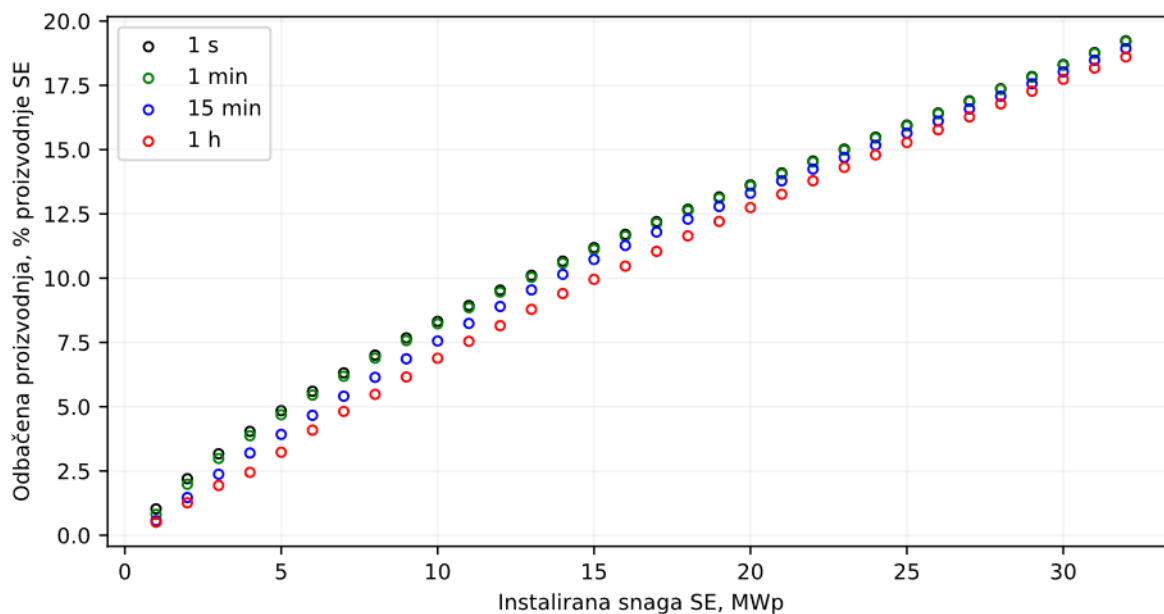


Slika 6-22 Odbačena proizvodnja u % kod proširenja VE sa SE i priključnoj snazi 90% iznosa instalirane snage VE – usporedba 1 min i 1 h rezolucije

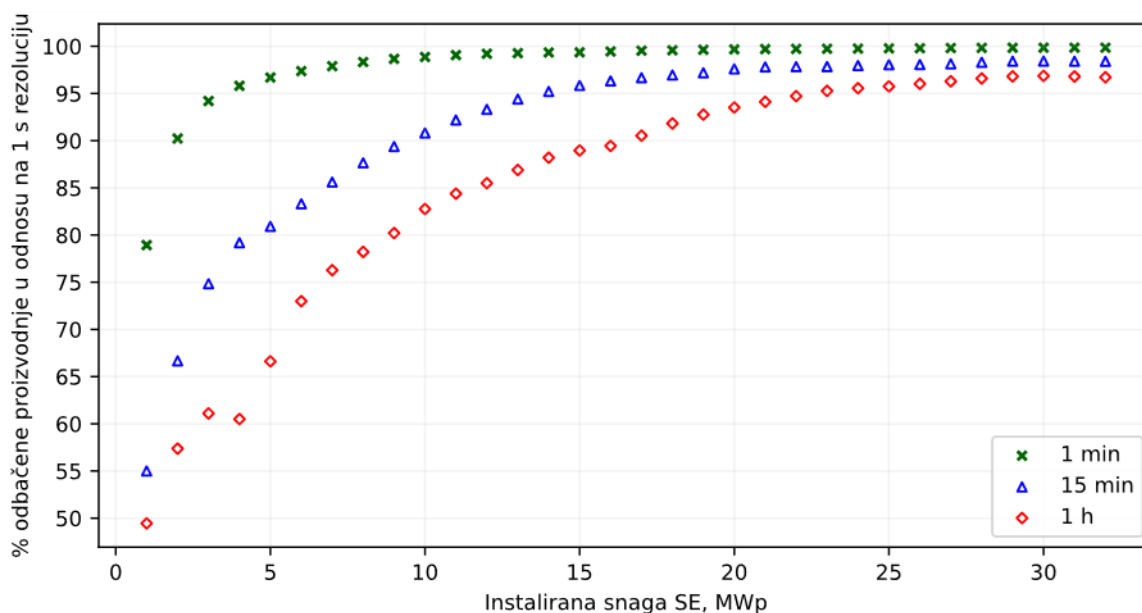


Slika 6-23 Odbačena proizvodnja u % kod proširenja VE sa SE i priključnoj snazi 90% iznosa instalirane snage VE – usporedba 1 min i 15 min rezolucije

Dotatna analiza za isti raspon proširenja VE sa SE napravljena je na kraćem periodu za travanj 2021., ali uz korištenje i 1 s rezolucije. Ako se odbačena proizvodnja proračunata u 1 min, 15 min i 1 h rezoluciji izrazi u % 1 s odbačene proizvodnje, dobivaju se rezultati prema slici 6-24 (b). U ovom slučaju vidljivo je da nema razlike u odbačenoj proizvodnji računatoj u 1 min i 1 s rezoluciji do 10 MWp, a daljnjim smanjenjem instalirane snage SE razlike postaju izraženije, osobito za SE instalirane snage 1 MWp i 2 MWp.



(a)



(b)

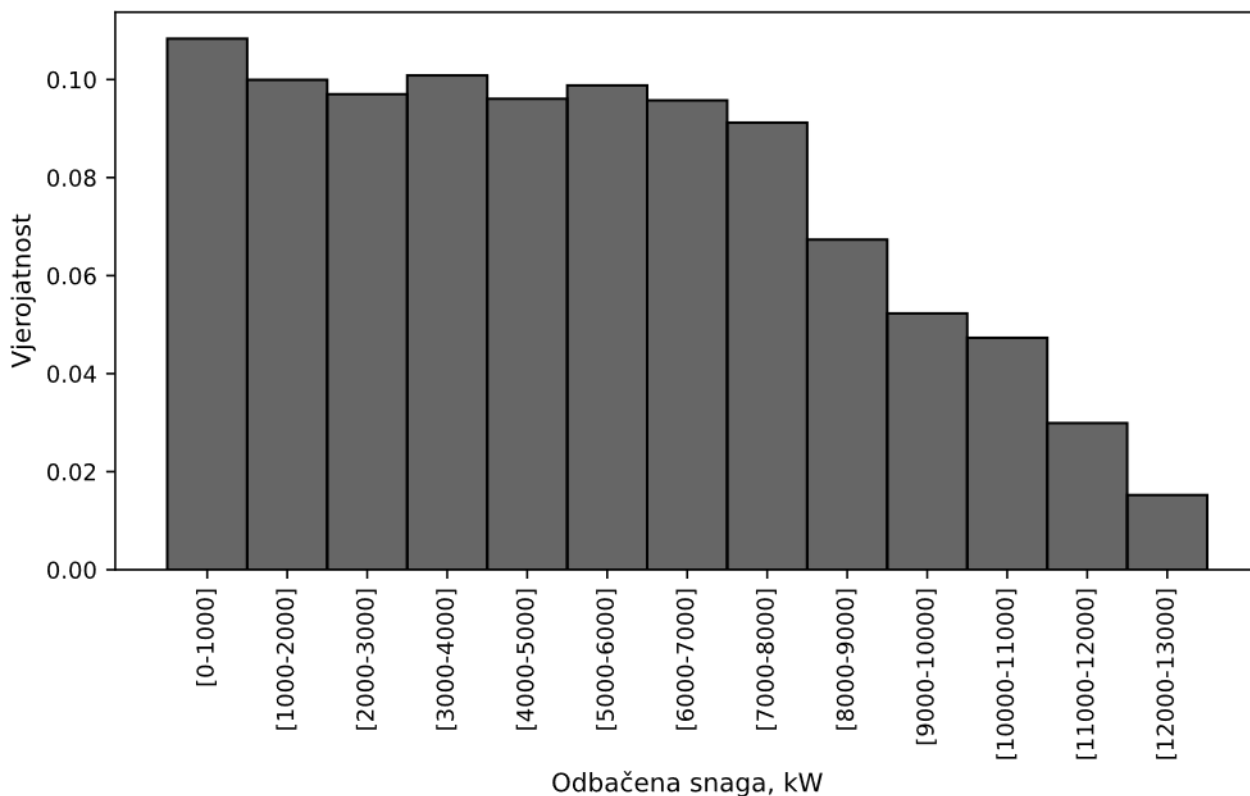
Slika 6-24 Odbačena proizvodnja pri proširenju postojeće VE 32 MW sa SE u rasponu 1 MWp – 32 MWp prikazana kao (a) % vrijednost u odnosu na proizvodnju SE za 1 s, 1 min, 15 min i 1 h rezoluciji i (b) iznos 1 min, 15 min i 1 h u odnosu na iznos u 1 s rezoluciji, izražen u % 1 s odbačene proizvodnje

6.5 Statistička analiza odbačene proizvodnje

Statistička analiza odbačene proizvodnje razmatrana je za bazni slučaj hibridne elektrane sa VE 25,6 MW (osam VA) i SE 25,6 MWp, pri čemu je razmatran cjelokupni dostupni period proizvodnje od jedne godine u 1 s rezoluciji. Prikjučna snaga iznosi 70% instalirane snage hibridne elektrane kao i u potpoglavlju 6.3.2.

Slika 6-25 prikazuje distribuciju vjerojatnosti odbačene proizvodnje. Maksimalna zabilježena proizvodnja hibridne elektrane iznosi cca 48512 kW, što za odabranu priključnu snagu rezultira maksimalnom odbačenom snagom od 12673 kW. Distribucija vjerojatnosti podijeljena je stoga u 13 raspona duljine 1000 kW do uključivo 13000 kW. Očekivano, u odbačenoj snazi učestalije se javljaju manji iznosi, što je u

skladu s distribucijom dobivenoj korištenjem nižih vremenskih rezolucija. Međutim, nema značajnih razlika učestalosti pojave odbačene snage između 0 – 1000 kW i npr. 7000 kW – 8000 kW.

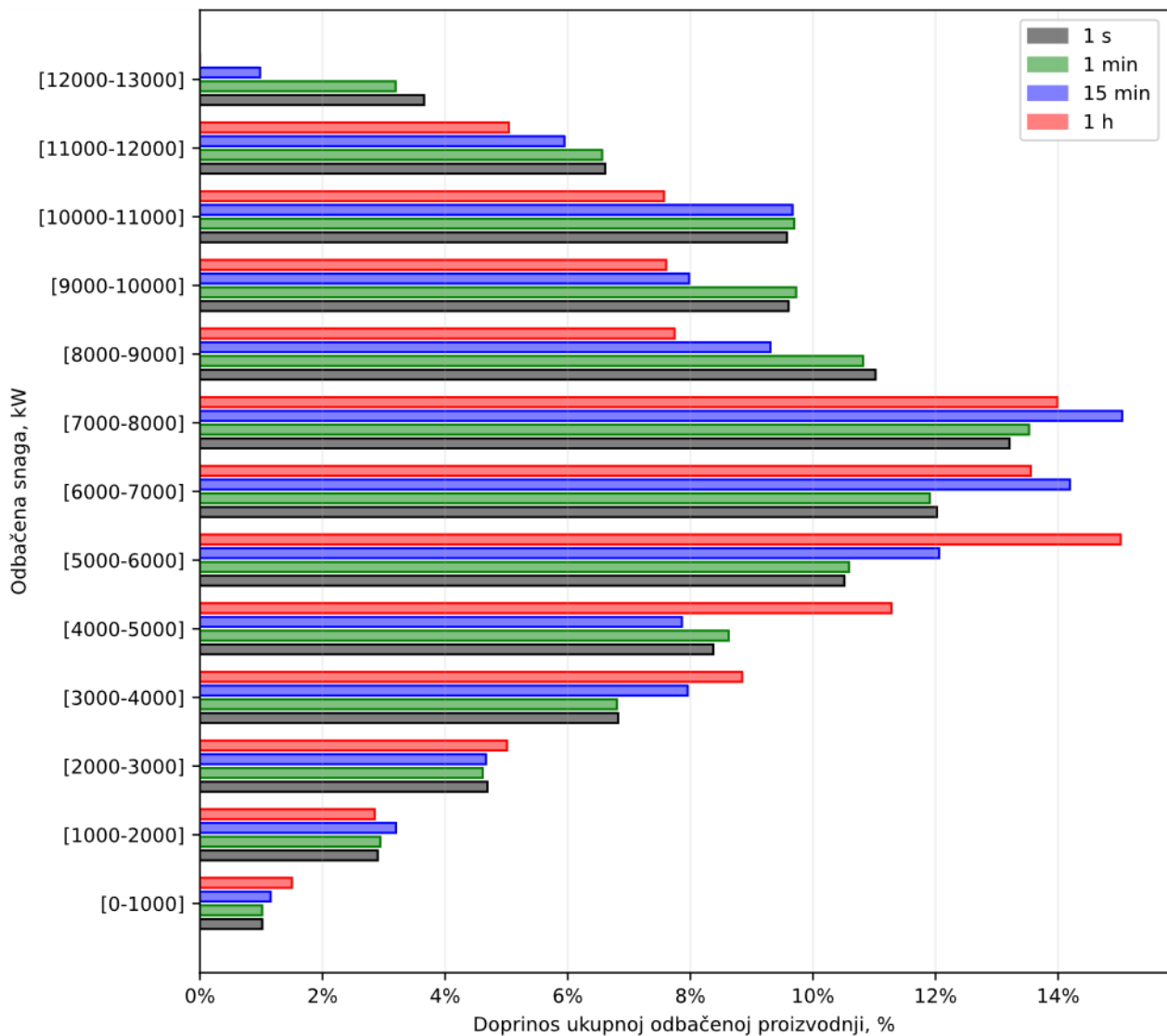


Slika 6-25 Distribucija vjerojatnosti pojave odbačene proizvodnje u 1 s rezoluciji

Važnije od same učestalosti pojave odbačene snage je odrediti koliko iznosi doprinos pojedinog raspona odbačene snage na ukupnu odbačenu proizvodnju u postotnom iznosu. Doprinos je dobiven na način da je za svaki raspon izračunata suma svih iznosa odbačene snage, a potom je ista normalizirana s ukupnom odbačenom proizvodnjom i izražena u postotnim iznosima:

$$\Delta E_{\%,i}^{op} = \frac{\sum_{t \in \text{raspon}_i} \Delta P_t^{op}}{\sum_{t \in T} \Delta P_t^{op}} \quad (6.3)$$

Tako definirani doprinos izračunat je za 1 s, 1 min, 15 min i 1 h vremenske rezolucije. Doprinosi po rasponima su prikazani na slici 6-26. Na prikazanom grafu uočava se da je doprinos učestalih iznosa odbačene proizvodnje 0 – 1000 kW ukupnoj odbačenoj proizvodnji reda veličine 1%, što znači da kratkotrajna prekoračenja nemaju značajnijeg utjecaja na odbačenu proizvodnju. Prethodno vrijedi za sve razmatrane vremenske rezolucije. Međutim, odbačena snaga u 1 h rezolucije se češće javlja u rasponu između 3000 kW – 8000 kW, zbog čega je doprinos ukupnoj odbačenoj proizvodnji veći u odnosu na 1 s ili 1 min rezoluciju.



Slika 6-26 Doprinos pojedinačnog raspona odbačene snage ukupnoj odbačenoj proizvodnji za 1 h, 15 min, 1 min i 1 s rezoluciju

Kao što je prethodno navedeno, odbačena proizvodnja u 1 s rezoluciji je uvijek veća u odnosu na nižu rezoluciju budući da se usrednjenjem na šire vremenske intervale zanemaruju fluktuacije snage s kraćim periodom. Odbačena proizvodnja računata u 1 s rezoluciji i u nižoj rezoluciji, npr. 1 h, bit će jednaka samo ako su sve 1 s vrijednosti tijekom 1 h intervala veće od priključne snage. Dakle, dodatna odbačena proizvodnja javlja se tijekom perioda kada je (primjer za 1 s i 1 h rezoluciju):

- proizvodnja hibridne elektrane u 1 h rezoluciji manja od priključne snage, dok je istovremeno u pojedinim 1 s intervalima tijekom 1 h veća od priključne snage;
- proizvodnja hibridne elektrane u 1 h rezoluciji veća od priključne snage, a proizvodnja u 1 s intervalima je veća od priključne snage u dijelu 1 h intervala.

U razmatranoj varijanti, dio dodatne odbačene proizvodnje koji se javlja kada je proizvodnja hibridne elektrane u 1 s rezoluciji veća od priključne snage, dok je proizvodnja hibridne elektrane u 1 h rezoluciji manja od priključne snage, čini 56% dodatne odbačene proizvodnje.

6.6 Diskusija rezultata

Vremenska rezolucija izlazne snage VE i SE ima utjecaja na procjenu odbačene proizvodnje hibridnih elektrana budući da se korištenjem nižih vremenskih rezolucija poravnavaju vršne vrijednosti snage koje se javljaju unutar intervala usrednjenja. Postojeći radovi vezani za analizu odbačene proizvodnje u hibridnim elektranama koriste niske vremenske rezolucije (najčešće 1 h prosjeke), ili više, ali bez usporedne analize odbačene proizvodnje s kojom se dobiva uvid u iznose pri različitim vremenskim rezolucijama. Analiza odbačene proizvodnje u hibridnim elektranama kod primjene niske vremenske rezolucije je jednostavna zbog dostupnosti klasičnih modela VE i SE koji daju zadovoljavajuću razinu točnosti. Skaliranje proizvodnje VE i SE s ciljem ispitivanja odbačene proizvodnje za različite omjere instalirane snage VE/SE u hibridnoj elektrani također ne unosi veću pogrešku jer efekt poravnanja nije znatno izražen pri nižim vremenskim rezolucijama.

Isto, dakako, ne vrijedi kod primjene visokih vremenskih rezolucija s kojima se obuhvaća širi spektar frekvencija fluktuacija izlazne snage VE i SE. Pri tako visokim vremenskim rezolucijama efekt poravnanja ima znatan utjecaj na promjene u odbačenoj proizvodnji jer će se prigušenje fluktuacija snage direktno odraziti na iznos odbačene proizvodnje. Štoviše, kada se koriste visoke vremenske rezolucije pokazano je da skaliranje proizvodnje jednog VA (primjenom pojednostavljenog modela s kojim se ne uvažava efekt poravnanja) od 1 s do 5 min vremenske rezolucije može uzrokovati 10% – 20% razlike u odbačenoj proizvodnji u odnosu na stvarnu vrijednost. Dakle, potrebna je promjena pristupa analize odbačene proizvodnje, prvenstveno korištenjem operativnih podataka proizvodnje u visokim vremenskim rezolucijama ili primjenom drugačijih modela VE i SE (klasični modeli VE i SE nisu prikladni za više vremenske rezolucije) s kojima je moguće efekt poravnanja uzeti u obzir. Također, potrebno je uzeti u obzir i veličinu VE i SE s kojom je efekt poravnanja direktno povezan (npr. veći broj VA u VE i veća površina FN modula kod SE).

U ovom poglavlju, analiza odbačene proizvodnje provedena je pri različitim vremenskim rezolucijama, počevši od najviše dostupne, tj. 1 s, do nižih vremenskih rezolucija, uključivo do 1 h. Analiza je uzela u obzir omjer priključne i instalirane snage hibridne elektrane, udio snage VE/SE i veličinu VE i SE. Rezultati analize sugeriraju da će se primjenom 1 h vremenske rezolucije uvesti pogreška u procjenu odbačene proizvodnje. Na primjeru hibridne elektrane instalirane snage 25,6 MW/25,6 MWp i pri priključnoj snazi 70% instalirane snage hibridne elektrane, pokazano je da će odbačena proizvodnja procijenjena u 1 h rezoluciji iznositi 87% stvarne odbačene proizvodnje (procijenjene u 1 s rezoluciji), što rezultira pogreškom od 13%. Ova pogreška se povećava na 17% za hibridnu elektranu 6,4 MW/6,4 MWp, dok se smanjuje na 10% za hibridnu elektranu 480 MW/480 MWp. Bitno je, dakle, naglasiti da veličina hibridne elektrane ima važnu ulogu u procjeni odbačene proizvodnje, naročito za elektrane s instaliranom snagom manjom od 10 MW/10 MWp. Međutim, VE i SE s instaliranom snagom manjom od nazivne snage VA (3200 kW) nisu u fokusu ove analize, s obzirom na industrijski trend prema većim snagama. Današnji komercijalni VA obično imaju nazivnu snagu između 5 MW i 7 MW, dok se manji VA rijetko proizvode [138]. Stoga, analiza manjih hibridnih elektrana ne nosi veliku praktičnu važnost.

Detaljnije preporuke o vremenskoj rezoluciji za studije odbačene proizvodnje nisu adekvatno obrađene i opravdane u literaturi. Prema tehničkom izvješću [41] i radu na koji se izvještaj referira [18], preporuča se upotreba 15 min ili 10 min vremenske rezolucije za VE i SE pozivajući se na iskustvo investitora na hibridnoj elektrani Parc Cynog u Walesu. Riječ je o prvoj većoj hibridnoj elektrani u Europi koja je objedinila VE i SE,

a prema podacima [139], instalirana snaga je oko 5 MW SE i 3,6 MW VE. Međutim, preporuke nisu uzimale u obzir veličinu elektrane. Rezultati istraživanja u sklopu ovog rada, na primjeru hibridne elektrane 25,6 MW/25,6 MWp, također pokazuju da 10 min ili 15 min rezolucija omogućava precizniju procjenu nego 1 h rezolucija. Na navedenoj snazi, proračunom u 15 min rezoluciji procijenjena odbačena proizvodnja iznosi 94%, dok 10 min rezolucija iznosi 96% stvarne odbačene proizvodnje (procjena u 1 h rezoluciji iznosila je 87%). To sugerira pogrešku od 4% do 6%, koja se smanjuje kod hibridnih elektrana većih snaga. Međutim, kod hibridne elektrane 6,4 MW/6,4 MWp (najmanja razmatrana) pogreška u procjeni se povećava na 8% i 9% u 10 min i 15 min, respektivno. Stoga, kod manjih elektrana, preciznost se može povećati primjenom 1 min rezolucije.

U svim razmatranim veličinama hibridne elektrane, do najmanje razmatrane 6,4 MW/6,4 MWp, uočeno je da razlike u odbačenoj proizvodnji između 1 s i 1 min rezolucije gotovo ne postoje. Navedeno sugerira da rezolucije veće od 1 minute ne pružaju dodatnu preciznost u procjeni odbačene proizvodnje. Ovaj rezultat posljedica je značajnijeg prigušenja fluktuacija izlazne snage VE i SE s periodom kraćim od 60 s, što indirektno utječe na odbačenu proizvodnju.

Omjer priključne/instalirane snage hibridne elektrane je ključan tijekom planiranja izgradnje hibridne elektrane zbog njegovog visokog utjecaja na odbačenu proizvodnju. Analiziran je raspon omjera P^{max}/P^{hpp} od 50% do 90%, gdje manji omjer uzrokuje veću odbačenu proizvodnju. Međutim, postoji obrnuti učinak gdje smanjenje omjera P^{max}/P^{hpp} rezultira manjom *dodatnom* odbačenom proizvodnjom. Na primjer, kod omjera P^{max}/P^{hpp} od 90%, razlike u odbačenoj proizvodnji kod različitih vremenskih rezolucija su veće nego kod omjera 70%. Konkretno, razlike između 1 s i 1 h rezolucija za razdoblje analiziranih podataka od ožujka do svibnja za omjere od 50%, 70% i 85% su redosljedno 5,9%, 12,9% i 35,7%. Iako veći omjeri rezultiraju većim postotnim razlikama, apsolutni iznosi odbačene proizvodnje su manji. Razlike u dodatnoj odbačenoj proizvodnji mogu se povezati s manjom vjerojatnošću prekoračenja priključne snage, npr. kod omjera od 70% u usporedbi s 50%. U praksi, značajne postotne razlike kod malih iznosa odbačene proizvodnje nisu od primarne važnosti.

Kod hibridizacije postojeće VE s novom SE, uz pretpostavku da priključna snaga odgovara instaliranoj snazi VE, rijetko je ekonomski isplativo težiti jednakim omjerima VE i SE. To bi rezultiralo velikim iznosom odbačene proizvodnje jer bi ukupna instalirana snaga hibridne elektrane bila dvostruko veća od priključne. Stoga, pri hibridizaciji bez povećanje priključne snage, instalirana snaga SE treba biti manja od VE. Kada se razmatra hibridizacija VE manje instalirane snage (npr. <10 MW) instalirana snaga SE treba biti proporcionalno smanjena. U tom slučaju, očekuje se veća pogreška u procjeni odbačene proizvodnje pri nižim vremenskim rezolucijama. Preliminarni rezultati pokazuju da kod SE instalirane snage 1 MWp i 2 MWp pogreška u procjeni može biti značajno veća, čak i pri 1 min rezoluciji. Daljnje istraživanje je potrebno kako bi se odredila adekvatna vremenska rezolucija za hibridne elektrane s manjom instaliranom snagom SE.

6.6.1 Ograničenja

U konačnici, potrebno je iznijeti i ograničenja u analizi odbačene proizvodnje. S obzirom da se analiza odbačene proizvodnje zasniva na modelu hibridne elektrane, vrijede sva ograničenja na razini modula prethodno iznesena u potpoglavljima 5.4.5 (za VE) i 5.5.3 (za SE).

Analiza odbačene proizvodnje provedena su za vjetroagregate specifičnog tipa s nazivnom snagom 3200 kW i dvostrano napajanim asinkronim generatorom. S obzirom na veće nazivne snage suvremenih VA (npr. 4,5 MW – 7,0 MW), predviđa se da će oni imati manje fluktuacije proizvodnje zbog veće inercije. Međutim, bez daljnjeg istraživanja nije moguće zaključiti kako će se efekt poravnanja u VE promijeniti ako se razmatranja provedu uspoređujući veći broj VA snage 3200 kW u odnosu na manji broj suvremenih VA, uz pretpostavku iste instalirane snage VE.

Za sunčane elektrane, analiza pretpostavlja da je za 1 MWp snage potreban jedan hektar površine (1 MWp/Ha). Ova pretpostavka je nužna jer prema [48], površina SE, a ne njezina instalirana snaga, utječe na prigušenje fluktuacija. Stvarna površina SE ovisit će o mnogim faktorima, uključujući tip i efikasnost modula, GCR faktor (razmak između redova susjednih FN tabli) i infrastrukturnih komponenti poput internih prometnica, trafostanica, itd. Trenutni trendovi ukazuju na sve češću upotrebu montažnih konstrukcija s jednoosnim praćenjem i bifacijalnim modulima u SE, no ovaj rad ne analizira razlike u odbačenoj proizvodnji između različitih tehnologija SE.

Klimatski uvjeti također imaju važnu ulogu u analizi odbačene proizvodnje. Odbačena proizvodnja ovisi o komplementarnosti između proizvodnje VE i SE, koja se može razlikovati ovisno o geografskoj lokaciji (sukladno potpoglavlju 3.2.1). Očekuje se da će se rezultati odbačene proizvodnje razlikovati na lokacijama s različitom komplementarnošću resursa. Međutim, pri višim vremenskim rezolucijama, komplementarnost između fluktuacija u proizvodnji VE i SE postaje zanemariva. Usprkos tome, lokalne klimatske varijacije mogu utjecati na fluktuacije, što zahtjeva dodatna istraživanja. S obzirom na visoko prigušenje fluktuacija u većim hibridnim elektranama, utjecaj brzih fluktuacija je značajno ograničen.

U kontekstu priključne snage i na temelju ranijih radovima, u disertaciji se svako kratkotrajno prekoračenje priključne snage računa kao odbačena snaga/proizvodnja. Elektrane su obvezne osigurati da njihova prosječna snaga tijekom obračunskog intervala (uobičajeno 15 minuta) ne prelazi priključnu snagu. Prema hrvatskoj regulativi, povremena prekoračenja su dopuštena, pod uvjetom da prosječna snaga unutar 15 min intervala ne premašuje priključnu snagu. Regulacija snage provodi se putem regulatora hibridne elektrane, stoga fleksibilnost prekoračenja priključne snage ovisi o dinamici i odzivu regulatora. U potpoglavlju 3.3.3, analizirajući operativnu VE, evidentirana su kratkotrajna prekoračenja manja od 1% priključne snage mjereno u 1 s rezoluciji. Na 1 min rezoluciji ta prekoračenja su znatno manja. Rezultatima ovog poglavlja pokazano je da nema razlike u odbačenoj proizvodnji između 1 s i 1 min rezolucije za veće hibridne elektrane. Stoga se zaključuje da će prekoračenja kraća od 1 min imati zanemarivi utjecaj na analitičke rezultate dobivene u ovom poglavlju.

7. PREGLED ZNANSTVENOG DOPRINOSA

Izvorni znanstveni doprinos doktorske disertacije ostvaren je kroz sljedeće stavke:

1. Razvoj modela hibridne elektrane visoke vremenske rezolucije koji se sastoji od novog specijaliziranog modula za proizvodnju vjetroelektrane temeljenog na proizvodnji jednog ili više vjetroagregata, primjenom metode maksimalnog preklapanja diskretne wavelet transformacije i multirezolucijske analize, te unaprjeđenog modula sunčane elektrane.
2. Analizu i modeliranje utjecaja primjene različitih vremenskih rezolucija na iznos odbačene proizvodnje hibridne elektrane korištenjem prethodno razvijenog modela hibridne elektrane uz uvažavanje efekta poravnanja pri višim vremenskim rezolucijama.
3. Analizu i modeliranje utjecaja iznosa i omjera instalirane snage vjetroelektrane i sunčane elektrane u odnosu na priključnu snagu hibridne elektrane na iznos odbačene proizvodnje.

Prvi znanstveni doprinos ostvaren je kroz razradu u sklopu poglavlja 5. Razvijeni modul vjetroelektrane zasnovan je na primjeni MODWT MRA s kojom se vrši dekompozicija vremenske serije proizvodnje vjetroagregata na više vremenskih serija jednake duljine i odgovarajućeg frekvencijskog raspona, koje se u daljnjem koraku skaliraju na željenu snagu korištenjem dvije metode zasnovane na primjeni (a) uvedenih eksponenata prigušenja čiji su iznosi izvedeni iz analize fluktuacija proizvodnje operativne VE i (b) metode surogata vremenskih serija. Eksponenti prigušenja definiraju za koliki iznos će se fluktuacije pojedinog frekvencijskog raspona uvećati pri povećanju broja vjetroagregata u vjetroelektrani, a primjenjuju se u području srednjih i nižih frekvencija fluktuacija. Metoda surogata vremenskih serija koristi se u području viših frekvencija gdje su fluktuacije proizvodnje između vjetroagregata nekorelirane ili slabo korelirane. Ova metoda generira višestruke realizacije proizvodnje VA (pripadajućeg frekvencijskog raspona) na način da generirane vremenske serije proizvodnje zadržavaju dugoročne trendove odnosno područja viših/nižih fluktuacija, ali su lokalno dekorelirane u odnosu na originalnu vremensku seriju. Navedena svojstva zabilježena su na operativnim podacima između VA u području viših frekvencija fluktuacija proizvodnje. Specijalizirani modul VE uvažava teorijske karakteristike efekta poravnanja. Modul sunčane elektrane zasnovan je na postojećem radu [48] kod kojega se pretvorba sunčevog zračenja pod nagibom FN modula u proizvodnju SE vrši niskopropusnim filtrom prvog reda, a čiji parametri ovise o površini SE. Modul SE je nadograđen uključanjem temperaturnih gubitaka zbog zagrijavanja FN modula korištenjem Faimanovog modela [134] i detaljnom razradom energetske gubitaka u elektrani uzimajući u obzir topologiju hibridne elektrane koja se primjenjuje za veće instalirane snage (>1 MW/1 MWp).

Drugi i treći znanstveni doprinosi ostvareni su kroz razradu u sklopu poglavlja 6.

Drugi znanstveni doprinos ostvaren je korištenjem proizvodnje modela hibridne elektrane instalirane snage 25,6 MW (VE) i 25,6 MWp (SE) i fiksne priključne snage 35,8 MW (70% instalirane snage hibridne elektrane) u 1 s rezoluciji, koja je usrednjena na niz nižih vremenskih rezolucija, uključujući 2 s, 5 s, 10 s, 30 s, 1 min, 2 min, 5 min, 10 min, 15 min, 30 min i 1 h. Odbačena proizvodnja je proračunata za svaku kombinaciju prethodno spomenutih vremenskih rezolucija za VE i SE, čime je dobiven uvid u pogrešku u procjeni odbačene proizvodnje kod primjene različitih vremenskih rezolucija. Analiza je provedena zasebno na četiri perioda grupiranjem podataka na zimske, proljetne, ljetne i jesenske mjesece, čime se dodatno ispituje sezonski utjecaj na odbačenu proizvodnju. U konačnici, analiza odbačene proizvodnje razmatrana je i na cjelogodišnjem periodu korištenjem 1 min, 2 min, 5 min, 10 min, 15 min, 30 min i 1 h

rezolucije budući da je prethodnom analizom zaključeno da korištenjem viših vremenskih rezolucija u odnosu na 1 min nema utjecaja na procjenu odbačene proizvodnje.

Treći doprinos ostvaren je analizom odbačene proizvodnje pri promjeni iznosa/veličine hibridne elektrane u varijantama (a) izgradnje nove hibridne elektrane jednakog udjela instalirane snage VE i SE te (b) hibridizacije postojeće VE s novom SE. U varijanti (a), analiza se sastoji iz dva dijela. U prvom dijelu analize instalirana snaga hibridne elektrane skalirana je na željenu snagu uz zadržavanje omjera priključne/instalirane snage na iznosu 70%, čime se ispituje utjecaj veličine hibridne elektrane na odbačenu proizvodnju. Za svaku odabranu instaliranu snagu računata je odbačena proizvodnja korištenjem prethodno navedenih vremenskih rezolucija. U drugom dijelu analize, ispitan je utjecaj promjene omjera priključne/instalirane snage na odbačenu proizvodnju pri 1 h i 1 s vremenskoj rezoluciji. Ova analiza provedena je na hibridnoj elektrani promjenom omjera priključne/instalirane snage hibridne elektrane u rasponu 50% – 90% s korakom 5%. U varijanti (b), hibridizacija postojeće VE s novom SE provedena je uz proširenje s nadogradnjom SE u rasponu 10% – 100% instalirane snage VE. Pritom se smatra da prilikom proširenja priključna snaga ostaje nepromijenjena i da je jednaka (i) instaliranoj snazi VE te (ii) 90% instalirane snage VE.

Rezultatima analize iz šestog poglavlja dobiven je uvid u pogrešku u procjeni odbačene proizvodnje pri korištenju različitih vremenskih rezolucija. Nadalje, dane su preporuke za primjenu adekvatne vremenske rezolucije za procjenu odbačene proizvodnje u hibridnim elektranama s obzirom na iznos instalirane snage VE i SE odnosno veličinu hibridne elektrane.

8. ZAKLJUČAK

U ovoj doktorskoj disertaciji obrađena je problematika odbačene proizvodnje u hibridnim elektranama sa instaliranim snagama VE i SE >1 MW/1 MWp uslijed ograničenja priključne snage. Analiza odbačene proizvodnje provedena je pri (i) nižim vremenskim rezolucijama korištenjem dugoročnog perioda mjerenja i primjenom klasičnih modela VE i SE te (ii) različitim vremenskim rezolucijama tijekom perioda od jedne godine i korištenjem sofisticiranog modela hibridne elektrane predloženog u okviru ovog rada. Predloženi model hibridne elektrane sastoji se od pojedinačnih modula VE i SE. Modul VE izveden je iz teorijskih karakteristika efekta poravnanja operativnih vjetroelektrana korištenjem 1 s podataka proizvodnje VA, dok modul SE predstavlja unaprjeđenu verziju postojećeg modela SE, temeljenu na 1 s podacima sunčevog zračenja (GHI i DHI) i temperature zraka. Analiza je obuhvatila istraživanje utjecaja omjera priključne i instalirane snage hibridne elektrane, udjela VE i SE u hibridnoj elektrani i veličine VE i SE na odbačenu proizvodnju.

Mogućnost formiranja hibridne elektrane razmatrana je u prvoj varijanti pri izgradnji nove VE i SE, a u drugoj varijanti pri proširenju postojeće VE s novom SE uz nepromijenjenu priključnu snagu. Analiza provedena na približno desetogodišnjem periodu sugerira da, prilikom izgradnje nove hibridne elektrane, udio SE u hibridnoj elektrani treba biti između 40% i 70% kako bi se minimizirala odbačena proizvodnja. Pri tim omjerima VE/SE, priključna snaga može doseći do 60% instalirane snage hibridne elektrane bez značajnijeg povećanja odbačene proizvodnje. Kod hibridizacije postojeće VE sa SE, gdje je priključna snaga približno jednaka instaliranoj snazi VE, preporučeni udio SE iznosi 20% – 50% instalirane snage VE. Povećanjem SE iznad 50% instalirane snage VE odbačena proizvodnja naglo raste zbog nelinearne karakteristike ovisnosti odbačene proizvodnje o instaliranoj snazi hibridne elektrane.

Kod primjene nižih vremenskih rezolucija poput 1 satnih, klasični modeli VE i SE daju zadovoljavajuću točnost u procjeni odbačene proizvodnje. Povećanje/smanjenje instalirane snage VE i SE moguće je provesti množenjem vremenske serije proizvodnje na željenu snagu bez unošenja veće pogreške s obzirom da efekt poravnanja nije osobito izražen. Takav postupak, kojeg u okviru ovog rada nazivamo pojednostavljenom metodom, pri višim vremenskim rezolucijama (<10 min) uzrokuje prenaplašene fluktuacije snage pri povećanju instalirane snage, odnosno podcijenjene fluktuacije pri smanjenju instalirane snage. To je posljedica činjenice da se brze fluktuacije snage ne mijenjaju linearno s promjenom instalirane snage, kao što je to slučaj sa sporijim fluktuacijama koje se mogu zabilježiti pri nižim vremenskim rezolucijama. U tom pogledu prepoznata su dva osnovna ograničenja klasičnih modela pri višim vremenskim rezolucijama: (i) statička krivulja snage VA ne uvažava dinamičke karakteristike VA (primarno inerciju lopatica, turbine i generatora), a skaliranjem snage jednog ili više VA ne uzima se u obzir efekt poravnanja u VE; (ii) klasični model SE zasniva se na neodrživoj pretpostavci da je proizvodnja SE linearno proporcionalna upadnom sunčevom zračenju na FN module u cijelom frekvencijskom spektru. U oba slučaja, ova pojednostavljenja mogu dovesti do netočnih procjena odbačene proizvodnje zbog nerealnih fluktuacija proizvodnje VE i SE. Usporedbom odbačene proizvodnje kod primjene zbirne proizvodnje osam VA i pojednostavljenog modela (skaliranje proizvodnje VA), uz istu proizvodnju SE i priključnu snagu, pokazano je da pojednostavljeni model može uzrokovati pogrešku do 20% kod 1 s rezolucije, te cca 10% kod 5 min rezolucije. Predloženi model hibridne elektrane, koji se sastoji od modula VE i SE, prilikom skaliranja proizvodnje uvažava efekt poravnanja i omogućava precizniju procjenu

odbačene proizvodnje. U istom slučaju, pogreška kod predloženog modela iznositi će <1,5% za vremenske rezolucije od 1 s do 15 min.

Rezultati odbačene proizvodnje pri različitim vremenskim rezolucijama ukazuju da veličina hibridne elektrane ima važnu ulogu kod odabira adekvatne vremenske rezolucije. Svakako se preporuča izbjegavati korištenje 1 h rezolucije ako se želi postići preciznija procjena odbačene proizvodnje s obzirom da je pogreška u procjeni odbačene proizvodnje veća od 10%. Nadalje, za sve varijante veličina hibridne elektrane (najmanja je 6,4 MW/6,4 MWp) nisu uočene razlike u odbačenoj proizvodnji između 1 s i 1 min rezolucije. Ovaj rezultat sugerira da za procjenu odbačene proizvodnje nije potrebno korištenje rezolucije veće od 1 min za velike hibridne elektrane. Premda 1 min rezolucija daje najveću točnost procjene, redovito nije dostupna tijekom planiranja te se stoga općenito preporuča korištenje 10 min ili 15 min rezolucije. Kod vrlo velikih hibridnih elektrana ovim rezolucijama ostvaruje se slična preciznost kao i kod 1 min rezolucije, dok kod najmanje razmatrane elektrane rezultira pogreškom do 9%.

Kod izgradnje novih hibridnih elektrana, instalirane snage manje od 6,4 MW/6,4 MWp nisu analizirane s obzirom da industrijski trendovi pokazuju da će se nazivna snaga VA nastavljati povećavati (suvremeni VA imaju nazivnu snagu 4,5 MW – 7,0 MW), a proizvodnja VA manjih snaga postepeno ukidati. Ipak, kod hibridizacije postojećih VE manjih instaliranih snaga (npr. <10 MW) sa SE pogreška u procjeni odbačene proizvodnje može biti značajna ako je instalirana snaga SE npr. manja od 2 MWp. Preliminarni rezultati sugeriraju da se u takvim scenarijima i kod 1 min rezolucije može očekivati značajnija pogreška u procjeni. S obzirom da je fokus ovog rada bio na većim hibridnim elektranama, daljnje istraživanje je potrebno kako bi se utvrdila adekvatna vremenska rezolucija za manje hibridne elektrane.

Dobiveni rezultati iz analize odbačene proizvodnje doprinose postojećoj znanstvenoj literaturi. Na temelju kvantitativne analize, dane su konkretne preporuke vezane uz vremensku rezoluciju potrebnu za preciznu procjenu odbačene proizvodnje s obzirom na veličinu hibridnih elektrana. Predmetno istraživanje ujedno postavlja osnovu za daljnja istraživanja, koja je potrebno sagledati s obzirom na tehnološki napredak, ponajviše kod sunčanih elektrana i sustava za pohranu energije. U svjetlu novih trendova, daljnje istraživanje odbačene proizvodnje je moguće usmjeriti na primjenu montažnih konstrukcija s jednoosnim praćenjem i bifacijalnim FN modulima te na integraciju sustava za pohranu energije u kombinaciji sa VE i SE. Osim akademskoj zajednici, rezultati istraživanja u ovom radu poslužit će i u praktičnoj primjeni. S obzirom da se u skorijoj budućnosti očekuje veći zaokret energetskog sektora prema hibridnim rješenjima, rezultati analize odbačene proizvodnje od važnosti su i za izrađivače studija odbačene proizvodnje hibridnih elektrana, posebno u pogledu razumijevanja nedostataka klasičnih modela VE i SE te odabira adekvatne vremenske rezolucije za konkretni slučaj hibridne elektrane.

LITERATURA

- [1] „Real Decreto-ley 23/2020, de 23 de junio, por el que se aprueban medidas en materia de energía y en otros ámbitos para la reactivación económica.“, *LEGISLACIÓN CONSOLIDADA*, izd. 175. 2020.
- [2] D. Mazzeo, N. Matera, P. De Luca, C. Baglivo, P. Maria, i G. Oliveti, „A literature review and statistical analysis of photovoltaic-wind hybrid renewable system research by considering the most relevant 550 articles : An upgradable matrix literature database“, *J. Clean. Prod.*, sv. 295, str. 126070, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126070.
- [3] O. Lindberg, J. Arnqvist, J. Munkhammar, i D. Lingfors, „Review on power-production modeling of hybrid wind and PV power parks“, *J. Renew. Sustain. Energy*, sv. 13, izd. 4, 2021, doi: 10.1063/5.0056201.
- [4] J. Jurasz, F. A. Canales, A. Kies, M. Guezgouz, i A. Beluco, „A review on the complementarity of renewable energy sources: Concept, metrics, application and future research directions“, *Sol. Energy*, sv. 195, str. 703–724, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2019.11.087.
- [5] J. Widén, „Correlations between large-scale solar and wind power in a future scenario for Sweden“, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, sv. 2, izd. 2, str. 177–184, 2011, doi: 10.1109/TSTE.2010.2101620.
- [6] A. A. Prasad, R. A. Taylor, i M. Kay, „Assessment of solar and wind resource synergy in Australia“, *Appl. Energy*, sv. 190, str. 354–367, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.12.135.
- [7] G. Ren, J. Wan, J. Liu, i D. Yu, „Spatial and temporal assessments of complementarity for renewable energy resources in China“, *Energy*, sv. 177, str. 262–275, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.04.023.
- [8] D. Schindler, H. D. Behr, i C. Jung, „On the spatiotemporal variability and potential of complementarity of wind and solar resources“, *Energy Convers. Manag.*, sv. 218, str. 113016, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113016.
- [9] F. Monforti, T. Huld, K. Bódis, L. Vitali, M. D’Isidoro, i R. Lacal-Aránegui, „Assessing complementarity of wind and solar resources for energy production in Italy. A Monte Carlo approach“, *Renew. Energy*, sv. 63, str. 576–586, 2014, doi: 10.1016/j.renene.2013.10.028.
- [10] P. E. Bett i H. E. Thornton, „The climatological relationships between wind and solar energy supply in Britain“, *Renew. Energy*, sv. 87, str. 96–110, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.10.006.
- [11] M. M. Miglietta, T. Huld, i F. Monforti-Ferrario, „Local Complementarity of Wind and Solar Energy Resources over Europe: An Assessment Study from a Meteorological Perspective“, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, sv. 56, izd. 1, str. 217–234, 2016, doi: 10.1175/jamc-d-16-0031.1.
- [12] R. P. Gallardo, A. M. Ríos, i J. S. Ramírez, „Analysis of the solar and wind energetic complementarity in Mexico“, *J. Clean. Prod.*, sv. 268, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122323.
- [13] N. G. Dylan Harrison-Atlas, Caitlin Murphy, Anna Schleifer, „Temporal complementarity and value of wind-PV hybrid systems across the United States“, *Renew. Energy*, sv. 201, izd. 1, str. 111–123, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.10.060>.
- [14] O. Lindberg, D. Lingfors, i J. Arnqvist, „Analyzing the mechanisms behind temporal correlation between power sources using frequency separated time scales: A Swedish case study on PV and wind“, *Energy*, sv. 259, izd. August, str. 124817, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.124817.
- [15] L. Petersen, F. Iov, G. C. Tarnowski, V. Gevorgian, P. Koralewicz, i D. I. Stroe, „Validating performance models for hybrid power plant control assessment“, *Energies*, sv. 12, izd. 22, 2019, doi: 10.3390/en12224330.
- [16] R. Antunes Campos, L. Rafael do Nascimento, i R. Rüther, „The complementary nature between wind and photovoltaic generation in Brazil and the role of energy storage in utility-scale hybrid power plants“, *Energy Convers. Manag.*, sv. 221, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113160.
- [17] D. Ludwig, C. Breyer, A. A. Solomon, i R. Seguin, „Evaluation of an onsite integrated hybrid PV-Wind

- power plant“, *AIMS Energy*, sv. 8, izd. 5, str. 988–1006, 2020, doi: 10.3934/energy.2020.5.988.
- [18] V. Klonari, D. Fraile, R. Rossi, i M. Schmela, „Exploring the Viability of Hybrid Wind-Solar Power Plants“, u *4th International Hybrid Power Systems Workshop, Crete, Greece*, 2019, str. 22–23.
- [19] K. Dykes, J. King, i N. Diorio, „Research Opportunities in the Physical Design Optimization of Hybrid Power Plants“, National Renewable Energy Lab (NREL), Golden, CO (United States), 2019. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/74115.pdf>.
- [20] I. Mamia i J. Appelbaum, „Shadow analysis of wind turbines for dual use of land for combined wind and solar photovoltaic power generation“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, sv. 55, str. 713–718, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.11.009.
- [21] P. Y. Yin, C. Y. Cheng, H. M. Chen, i T. H. Wu, „Risk-aware optimal planning for a hybrid wind-solar farm“, *Renew. Energy*, sv. 157, str. 290–302, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.05.003.
- [22] A. R. Silva i A. Estanqueiro, „From Wind to Hybrid: A Contribution to the Optimal Design of Utility-Scale Hybrid Power Plants“, *Energies*, sv. 15, izd. 7, 2022, doi: 10.3390/en15072560.
- [23] D. B. Carvalho, E. C. Guardia, i J. W. Marangon Lima, „Technical-economic analysis of the insertion of PV power into a wind-solar hybrid system“, *Sol. Energy*, sv. 191, str. 530–539, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.06.070.
- [24] C. Ionita, A. G. Raducu, N. Styliaras, i J. Funkquist, „Online Optimization and Control for Renewable Hybrid Power Plants“, *4th Int. Hybrid Power Syst. Work. Crete, Greece*, 2019.
- [25] S. Z. M. Golroodbari i ostali, „Pooling the cable: A techno-economic feasibility study of integrating offshore floating photovoltaic solar technology within an offshore wind park“, *Sol. Energy*, sv. 219, str. 65–74, 2021, doi: 10.1016/j.solener.2020.12.062.
- [26] G. Aquila, A. R. de Queiroz, P. Rotela Junior, L. C. S. Rocha, E. de O. Pamplona, i P. P. Balestrassi, „Contribution for bidding of wind-photovoltaic on grid farms based on NBI-EFA-SNR method“, *Sustain. Energy Technol. Assessments*, sv. 40, str. 100754, 2020, doi: 10.1016/j.seta.2020.100754.
- [27] G. Aquila i ostali, „Proposed method for contracting of wind-photovoltaic projects connected to the Brazilian electric system using multiobjective programming“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, sv. 97, str. 377–389, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.08.054.
- [28] H. Long, M. Eghlimi, i Z. Zhang, „Configuration Optimization and Analysis of a Large Scale PV/Wind System“, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, sv. 8, izd. 1, str. 84–93, 2017, doi: 10.1109/TSTE.2016.2583469.
- [29] S. R. Ara, S. Paul, i Z. H. Rather, „Two-level planning approach to analyze techno-economic feasibility of hybrid offshore wind-solar pv power plants“, *Sustain. Energy Technol. Assessments*, sv. 47, 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101509.
- [30] N. P. Kumar, K. Balaraman, i C. S. R. Alta, „Optimizing system elements for hybrid wind - solar PV power plant“, u *2016 Biennial International Conference on Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy (PESTSE)*, 2016, str. 1–6, doi: 10.1109/PESTSE.2016.7516421.
- [31] R. Grab, A. Staiger, i S. Rogalla, „Optimizing the grid connection of Hybrid PV and wind power plants“, *Proc. ISES Sol. World Congr. 2019 IEA SHC Int. Conf. Sol. Heat. Cool. Build. Ind. 2019*, str. 1025–1033, 2020, doi: 10.18086/swc.2019.19.05.
- [32] R. De Azevedo i O. Mohammed, „Profit-maximizing utility-scale hybrid wind-PV farm modeling and optimization“, u *Proceedings of the IEEE SoutheastCon 2015*, 2015, str. 1–8, doi: 10.1109/SECON.2015.7132892.
- [33] Y. Cao, Y. Zhang, H. Zhang, X. Shi, i V. Terzija, „Probabilistic Optimal PV Capacity Planning for Wind Farm Expansion Based on NASA Data“, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, sv. 8, izd. 3, str. 1291–1300, 2017, doi: 10.1109/TSTE.2017.2677466.
- [34] N. P. Kumar, K. Balaraman, i C. S. R. Atla, „Optimal mix of wind-solar PV hybrid power plant with

- minimum variability“, *IEEE 6th Int. Conf. Power Syst. ICPS 2016*, 2016, doi: 10.1109/ICPES.2016.7584144.
- [35] P. Roy, J. He, T. Zhao, i Y. V. Singh, „Recent Advances of Wind-Solar Hybrid Renewable Energy Systems for Power Generation: A Review“, *IEEE Open J. Ind. Electron. Soc.*, sv. 3, izd. February, str. 81–104, 2022, doi: 10.1109/OJIES.2022.3144093.
- [36] A. Lange, M. Pasko, i D. Grabowski, „Selected aspects of wind and photovoltaic power plant operation and their cooperation“, *Bull. Polish Acad. Sci. Tech. Sci.*, sv. 69, izd. 6, 2021, doi: 10.24425/bpasts.2021.139793.
- [37] „Co-Location Investigation: A study into the potential for co-locating wind and solar farms in Australia“, AECOM Australia Pty Ltd (AECOM), Tehnički izvještaj, 2016.
- [38] A. Couto i A. Estanqueiro, „Assessment of wind and solar PV local complementarity for the hybridization of the wind power plants installed in Portugal“, *J. Clean. Prod.*, sv. 319, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128728.
- [39] O. Lindberg i D. Lingfors, „Oversizing Co-located Wind and Solar Parks to Increase the Capacity Factor“, *21st Wind Sol. Integr. Work.*, str. 1–7, 2022.
- [40] K. Das, A. D. Hansen, M. Koivisto, i P. E. Sørensen, „Enhanced features of wind-based hybrid power plants“, u *4th International Hybrid Power Systems Workshop*, 2019, str. 1–6.
- [41] WindEurope, „Renewable Hybrid Power Plants: Exploring the benefits and market opportunities“, Technical Report, 2019. Pristupljeno: ožu. 15, 2022. [Na internetu]. Dostupno na: <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/policy/position-papers/WindEurope-renewable-hybrid-power-plants-benefits-and-market-opportunities.pdf>.
- [42] H. G. Beyer, J. Luther, i R. Steinberger-Willms, „Power fluctuations from geographically diverse, grid coupled wind energy conversion systems.“, u *Proceedings of European Wind Energy Conference*, 1989, str. 311–314.
- [43] T. Nanahara, M. Asari, T. Sato, K. Yamaguchi, M. Shibata, i T. Maejima, „Smoothing effects of distributed wind turbines. Part 1. Coherence and smoothing effects at a wind farm“, *Wind Energy*, sv. 7, izd. 2, str. 61–74, 2004, doi: 10.1002/we.109.
- [44] A. Meglic i R. Goic, „Wavelet Multi-Scale Analysis of Wind Turbines Smoothing Effect and Power Fluctuations“, u *2021 9th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 2022, str. 1–6, doi: 10.1109/irsec53969.2021.9741097.
- [45] M. Yang, L. Zhang, Y. Cui, Y. Zhou, Y. Chen, i G. Yan, „Investigating the Wind Power Smoothing Effect Using Set Pair Analysis“, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, sv. 11, izd. 3, str. 1161–1172, 2020, doi: 10.1109/TSTE.2019.2920255.
- [46] R. Van Haaren, M. Morjaria, i V. Fthenakis, „Empirical assessment of short-term variability from utility-scale solar PV plants“, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, sv. 22, izd. 5, str. 548–559, 2012, doi: 10.1002/pip.2302.
- [47] J. Marcos, L. Marroyo, E. Lorenzo, D. Alvira, i E. Izco, „Power output fluctuations in large scale pv plants: One year observations with one second resolution and a derived analytic model“, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, sv. 19, izd. 2, str. 218–227, 2011, doi: 10.1002/pip.1016.
- [48] D. A. and E. I. Javier Marcos, Luis Marroyo, Eduardo Lorenzo, „From irradiance to output power fluctuations: the pv plant as a low pass filter“, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, sv. 19, izd. 5, str. 505–510, 2011, doi: <https://doi.org/10.1002/pip.1063>.
- [49] M. Lave, J. Kleissl, i J. S. Stein, „A wavelet-based variability model (WVM) for solar PV power plants“, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, sv. 4, izd. 2, str. 501–509, 2013, doi: 10.1109/TSTE.2012.2205716.
- [50] P. Li, H. Banakar, P. K. Keung, H. Golestani Far, i B. T. Ooi, „Macromodel of spatial smoothing in wind farms“, *IEEE Trans. Energy Convers.*, sv. 22, izd. 1, str. 119–128, 2007, doi: 10.1109/TEC.2006.889605.

- [51] T. Ackermann, *Wind Power in Power Systems*. John Wiley & Sons, 2005.
- [52] C. Tang, M. Pathmanathan, W. L. Soong, i N. Ertugrul, „Effects of inertia on dynamic performance of wind turbines“, u *2008 Australasian Universities Power Engineering Conference*, 2008, str. 1–6.
- [53] W. J. Farmer i A. J. Rix, „Modelling a wind turbine as a low-pass filter for wind to electrical power calculations“, u *2020 International SAUPEC/RobMech/PRASA Conference*, 2020, str. 1–6, doi: 10.1109/SAUPEC/RobMech/PRASA48453.2020.9041077.
- [54] M. Lave i J. Kleissl, „Cloud speed impact on solar variability scaling - Application to the wavelet variability model“, *Sol. Energy*, sv. 91, str. 11–21, 2013, doi: 10.1016/j.solener.2013.01.023.
- [55] A. R. Dyreson, E. R. Morgan, S. H. Monger, i T. L. Acker, „Modeling solar irradiance smoothing for large PV power plants using a 45-sensor network and the Wavelet Variability Model“, *Sol. Energy*, sv. 110, str. 482–495, 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.09.027.
- [56] A. L. Manwell, J. F.; McGowan, J. G.; Rogers, *Wind Energy Explained: Theory, design and application*. John Wiley & Sons, 2010.
- [57] „Technical Application Papers No.13 Wind power plants“, ABB SACE, 2011. [Na internetu]. Dostupno na: <https://library.e.abb.com/public/92faf0c1913f5651c1257937002f88e8/1SDC007112G0201.pdf>.
- [58] W. G. Früh, „Long-term wind resource and uncertainty estimation using wind records from Scotland as example“, *Renew. Energy*, sv. 50, str. 1014–1026, 2013, doi: 10.1016/j.renene.2012.08.047.
- [59] J. A. Carta, S. Velázquez, i P. Cabrera, „A review of measure-correlate-predict (MCP) methods used to estimate long-term wind characteristics at a target site“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, sv. 27, str. 362–400, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.07.004.
- [60] M. D. Mifsud, T. Sant, i R. N. Farrugia, „Analysing uncertainties in offshore wind farm power output using measure-correlate-predict methodologies“, *Wind Energy Sci.*, sv. 5, izd. 2, str. 601–621, 2020, doi: 10.5194/wes-5-601-2020.
- [61] A. T. Qureshi i V. Warudkar, „Wind farm layout optimization through optimal wind turbine placement using a hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm“, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, sv. 30, str. 77436–77452, 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27849-7>.
- [62] T. Göçmen, P. Van Der Laan, P. E. Réthoré, A. P. Diaz, G. C. Larsen, i S. Ott, „Wind turbine wake models developed at the technical university of Denmark: A review“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, sv. 60, str. 752–769, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.01.113.
- [63] S. Frandsen, „On the wind speed reduction in the center of large clusters of wind turbines“, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, sv. 39, izd. 1–3, str. 251–265, 1992, doi: 10.1016/0167-6105(92)90551-K.
- [64] C. L. Archer i ostali, „Review and evaluation of wake loss models for wind energy applications“, *Appl. Energy*, sv. 226, izd. February 2018, str. 1187–1207, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.05.085.
- [65] N. O. Jensen, „A note on wind generator interaction“, *Risø-M-2411 Risø Natl. Lab. Roskilde*, str. 1–16, 1983, [Na internetu]. Dostupno na: <http://www.risoe.dk/rispubl/VEA/veapdf/ris-m-2411.pdf>.
- [66] I. Katic, J. Højstrup, i N. O. Jensen, „A Simple Model for Cluster Efficiency“, u *European wind energy association conference and exhibition*, 1987, sv. 1.
- [67] P. Kulišić, J. Vuletin, i I. Zulim, *SUNČANE ČELIJE*. Školska knjiga, Zagreb, 1994.
- [68] A. Betti i ostali, „Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications, IEA-PVPS Task 16 Report 16-04:2021“, International Energy Agency (IEA), 2021.
- [69] P. G. Loutzenhiser, H. Manz, C. Felsmann, P. A. Strachan, T. Frank, i G. M. Maxwell, „Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy

- simulation“, *Sol. Energy*, sv. 81, izd. 2, str. 254–267, 2007, doi: 10.1016/j.solener.2006.03.009.
- [70] C. A. Gueymard i J. A. Ruiz-Arias, „Extensive worldwide validation and climate sensitivity analysis of direct irradiance predictions from 1-min global irradiance“, *Sol. Energy*, sv. 128, str. 1–30, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2015.10.010.
- [71] H. Hottel i A. Whillier, „Evaluation of flat-plate solar collector performance“, *Trans. Conf. Use Sol. Energy*, sv. 3, izd. 2, 1955.
- [72] T. M. Kuchler, „Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces“, *Sol. Energy*, sv. 23, str. 111–114, 1979.
- [73] J. A. Hay, J.E., Davies, „Calculations of the solar radiation incident on an inclined surface“, Proc of First Canadian Solar Radiation Data Workshop Canada: Ministry of Supply and Services, 1980.
- [74] D. T. Reindl, W. A. Beckman, i J. A. Duffie, „Evaluation of hourly tilted surface radiation models“, *Sol. Energy*, sv. 45, izd. 1, str. 9–17, 1990, doi: 10.1016/0038-092X(90)90061-G.
- [75] R. Perez, R. Seals, P. Ineichen, R. Stewart, i D. Menicucci, „A new simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces“, *Sol. Energy*, sv. 39, izd. 3, str. 221–231, 1987, doi: 10.1016/S0038-092X(87)80031-2.
- [76] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, i R. Stewart, „Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance“, *Sol. Energy*, sv. 44, izd. 5, str. 271–289, 1990, doi: 10.1016/0038-092X(90)90055-H.
- [77] A. Mermoud i B. Wittmer, „PVSYST USER’S MANUAL“. PVSYST SA, Switzerland, 2014, [Na internetu]. Dostupno na: www.pvsyst.com.
- [78] D. L. King, W. E. Boyson, i J. A. Kratochvil, „Photovoltaic array performance model, SANDIA Report SAND2004-3535“, *Sandia Rep. No. 2004-3535*, sv. 8, izd. December, str. 1–19, 2004.
- [79] D. A. Bowersox i S. M. MacAlpine, „Predicting Subhourly Clipping Losses for Utility-Scale PV Systems“, *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, str. 2507–2509, 2021, doi: 10.1109/PVSC43889.2021.9518956.
- [80] A. P. Dobos, „PVWatts Version 5 Manual (NREL/TP-6A20-62641)“, *Natl. Renew. Energy Lab.*, izd. September, str. 20, 2014, [Na internetu]. Dostupno na: <http://www.nrel.gov/docs/fy14osti/62641.pdf>.
- [81] „UREDBA KOMISIJE (EU) 2016/631 od 14. travnja 2016. o uspostavljanju mrežnih pravila za zahtjeve za priključivanje proizvođača električne energije na mrežu“, Europska komisija, 2016. [Na internetu]. Dostupno na: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32016R0631>.
- [82] O. Lindberg, „Analysis and Forecasting of Utility-Scale Hybrid Wind and PV Power Parks“, Licencijska disertacija, Upsalla, 2022.
- [83] K. Das *i ostali*, „Dynamic modelling of wind-solar-storage based hybrid power plant“. 18th Wind Integration Workshop, Dublin, Ireland, 2019.
- [84] D. V. Pombo, F. Iov, i D. I. Stroe, „A novel control architecture for hybrid power plants to provide coordinated frequency reserves“, *Energies*, sv. 12, izd. 5, 2019, doi: 10.3390/en12050919.
- [85] R. Grab i S. Rogalla, „Symbiotic operation of wind and PV farms connected to the high voltage grid“, *2017 IEEE 8th Int. Symp. Power Electron. Distrib. Gener. Syst. PEDG 2017*, 2017, doi: 10.1109/PEDG.2017.7972444.
- [86] F. Weschenfelder *i ostali*, „A review on the complementarity between grid-connected solar and wind power systems“, *J. Clean. Prod.*, sv. 257, str. 120617, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120617.
- [87] R. R. Hernandez, M. K. Hoffacker, i C. B. Field, „Efficient use of land to meet sustainable energy needs“, *Nat. Clim. Chang.*, sv. 5, izd. 4, str. 353–358, 2015, doi: 10.1038/nclimate2556.

- [88] C. E. Hoicka i I. H. Rowlands, „Solar and wind resource complementarity : Advancing options for renewable electricity integration in Ontario , Canada“, *Renew. Energy*, sv. 36, izd. 1, str. 97–107, 2011, doi: 10.1016/j.renene.2010.06.004.
- [89] C. M. St. Martin, J. K. Lundquist, i M. A. Handschy, „Variability of interconnected wind plants: Correlation length and its dependence on variability time scale“, *Environ. Res. Lett.*, sv. 10, izd. 4, 2015, doi: 10.1088/1748-9326/10/4/044004.
- [90] W. Katzenstein, E. Fertig, i J. Apt, „The variability of interconnected wind plants“, *Energy Policy*, sv. 38, izd. 8, str. 4400–4410, 2010, doi: 10.1016/j.enpol.2010.03.069.
- [91] H. Holttinen, „Hourly wind power variations in the nordic countries“, *Wind Energy*, sv. 8, izd. 2, str. 173–195, 2005, doi: 10.1002/we.144.
- [92] M. Denault, D. Dupuis, i S. Couture-Cardinal, „Complementarity of hydro and wind power: Improving the risk profile of energy inflows“, *Energy Policy*, sv. 37, izd. 12, str. 5376–5384, 2009, doi: 10.1016/j.enpol.2009.07.064.
- [93] S. Han *i ostali*, „Quantitative evaluation method for the complementarity of wind–solar–hydro power and optimization of wind–solar ratio“, *Appl. Energy*, sv. 236, izd. November 2018, str. 973–984, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.12.059.
- [94] A. Beluco, P. K. de Souza, i A. Krenzinger, „A dimensionless index evaluating the time complementarity between solar and hydraulic energies“, *Renew. Energy*, sv. 33, izd. 10, str. 2157–2165, 2008, doi: 10.1016/j.renene.2008.01.019.
- [95] A. Murata, H. Yamaguchi, i K. Otani, „A method of estimating the output fluctuation of many photovoltaic power generation systems dispersed in a wide area“, *Electr. Eng. Japan (English Transl. Denki Gakkai Ronbunshi)*, sv. 166, izd. 4, str. 9–19, 2009, doi: 10.1002/eej.20723.
- [96] D. Cantor, O. Mesa, i A. Ochoa, „Complementarity beyond correlation“, u *Complementarity of Variable Renewable Energy Sources*, 2022, str. 121–141.
- [97] D. Cantor, A. Ochoa, i O. Mesa, „Total Variation-Based Metrics for Assessing Complementarity in Energy Resources Time Series“, *Sustain.*, sv. 14, izd. 14, 2022, doi: 10.3390/su14148514.
- [98] „Zahtjevi za priključak elektrane na distribucijsku mrežu – 2. dio: Priključak na srednjonaponsku distribucijsku mrežu – Elektrane do uključivo tipa B“. HRN EN 50549-2, Prvo izdanje, veljača 2019.
- [99] „windPRO 3.2“. EMD International A/S, 2018, [Na internetu]. Dostupno na: www.emd.dk.
- [100] G. Van Rossum i F. L. Drake, „Python 3 Reference Manual“. CreateSpace, Scotts Valley, CA, 2009.
- [101] A. Meglic i R. Goic, „Impact of Time Resolution on Curtailment Losses in Hybrid Wind-Solar PV Plants“, *Energies*, sv. 15, izd. 16, str. 1–26, 2022, doi: 10.3390/en15165968.
- [102] A. Meglic, „Analiza odbačene proizvodnje hibridnih elektrana uslijed ograničenja priključne snage: podaci vjetroelektrana A, B i C“. Zenodo, stu. 2023, doi: 10.5281/zenodo.10204651.
- [103] A. Meglic, „Analiza odbačene proizvodnje hibridnih elektrana uslijed ograničenja priključne snage: podaci s vjetroelektrane - dio 1“. Zenodo, stu. 2023, doi: 10.5281/zenodo.10203510.
- [104] A. Meglic, „Analiza odbačene proizvodnje hibridnih elektrana uslijed ograničenja priključne snage: podaci s vjetroelektrane - dio 2“. Zenodo, stu. 2023, doi: 10.5281/zenodo.10203661.
- [105] A. Meglic, „Analiza odbačene proizvodnje hibridnih elektrana uslijed ograničenja priključne snage: podaci s vjetroelektrane - dio 3“. Zenodo, stu. 2023, doi: 10.5281/zenodo.10203802.
- [106] A. Meglic, „Analiza odbačene proizvodnje hibridnih elektrana uslijed ograničenja priključne snage: podaci s vjetroelektrane - dio 4“. Zenodo, stu. 2023, doi: 10.5281/zenodo.10204016.
- [107] A. Meglic, „Analiza odbačene proizvodnje hibridnih elektrana uslijed ograničenja priključne snage: podaci s mjernog stupa“. Zenodo, stu. 2023, doi: 10.5281/zenodo.10204475.
- [108] F. Miao, X. Tang, i Z. Qi, „Fluctuation feature extraction of wind power“, *2012 IEEE Innov. Smart*

Grid Technol. - Asia, ISGT Asia 2012, str. 1–5, 2012, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2012.6303279.

- [109] I. Daubechies, „1. The What, Why, and How of Wavelets“, u *Ten Lectures on Wavelets*, 1992, str. 1–16.
- [110] D. B. Percival i A. T. Walden, „Wavelet Methods for Time Series Analysis“, *Wavelet Methods for Time Series Analysis*. 2000, doi: 10.1017/cbo9780511841040.
- [111] S. G. Mallat, „A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation“, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, sv. 11, izd. 7, str. 674–693, 1989, doi: 10.1109/34.192463.
- [112] S. R. Haqshenas i N. Saffari, „Multi-resolution analysis of passive cavitation detector signals“, *J. Phys. Conf. Ser.*, sv. 581, izd. 1, 2015, doi: 10.1088/1742-6596/581/1/012004.
- [113] B. Whitcher, P. Guttorp, i D. B. Percival, „Wavelet analysis of covariance with application to atmospheric time series“, *J. Geophys. Res. Atmos.*, sv. 105, izd. D11, str. 14941–14962, 2000, doi: 10.1029/2000JD900110.
- [114] A. Cimatoribus, „Discrete wavelet methods for time series analysis using python“, *GitLab*, 2016. <https://gitlab.com/Cimatoribus/wmtsa-python>.
- [115] C. Cornish, „WMTSA Wavelet Toolkit for MATLAB“, 2006. <https://atmos.uw.edu/~wmtsa/>.
- [116] „MATLAB, Version: 9.13.0 (R2022b)“, *MathWorks Inc.*, 2022. .
- [117] IEC 61400-12-2, *Wind energy generation systems - Part 12-2: Power performance of electricity producing wind turbines based on nacelle anemometry*. 2022.
- [118] Z. L. Yang, Z. Z. Li, R. X. Liu, J. Y. Hou, i J. Zhang, „Fitting the Variations from the Wind Speed to the Active Power of a Wind Powered Generator by a Low-Pass Filter“, u *Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, 2019, str. 1685–1690, doi: 10.1109/WCICA.2018.8630638.
- [119] D. B. Percival, „On Estimation of the Wavelet Variance“, *Biometrika Trust*, sv. 82, izd. 3, str. 619–631, 2016.
- [120] M. Tabar i ostali, „Kolmogorov spectrum of renewable wind and solar power fluctuations“, *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, sv. 223, izd. 12, str. 2637–2644, 2014, doi: 10.1140/epjst/e2014-02217-8.
- [121] J. Apt i A. Curtright, „The Spectrum of power from utility-scale wind farms and solar photovoltaic arrays“, *Tehnički izvještaj*, 2004.
- [122] J. Apt, „The spectrum of power from wind turbines“, *J. Power Sources*, sv. 169, izd. 2, str. 369–374, 2007, doi: 10.1016/j.jpowsour.2007.02.077.
- [123] C. Xiaodong, Z. Wen, T. Nwachukwu, i I. A. Hiskens, „Characterization of daily wind farm power fluctuations using wavelet transform“, *Proc. - 4th Int. Conf. Nat. Comput. ICNC 2008*, sv. 4, izd. 2, str. 481–485, 2008, doi: 10.1109/ICNC.2008.133.
- [124] G. Zhou i ostali, „Research on wind power fluctuation and its impacts on power system frequency“, *Appl. Mech. Mater.*, sv. 291–294, str. 407–414, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.291-294.407.
- [125] F. Bai, R. Yan, i T. K. Saha, „Variability study of a utility-scale PV plant in the fringe of grid“, *2017 IEEE Innov. Smart Grid Technol. - Asia Smart Grid Smart Community, ISGT-Asia 2017*, str. 1–5, 2018, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2017.8378436.
- [126] S. Shedd, B. Hodge, A. Florita, i K. Orwig, „A Statistical Characterization of Solar Photovoltaic Power Variability at Small Timescales“, *National Renewable Energy Lab (NREL), Golden, CO (United States)*, 2012.
- [127] P. Virtanen i ostali, „SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python“, *Nat. Methods*, sv. 17, izd. 3, str. 261–272, 2020, doi: 10.1038/s41592-019-0686-2.
- [128] M. S. Bartlett, „Periodogram Analysis and Continuous Spectra“, *Biometrika*, sv. 37, izd. 1/2, str. 1–

- 16, 1950, Pristupljeno: sij. 30, 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <http://www.jstor.org/stable/2332141>.
- [129] T. Nakamura i M. Small, „Small-shuffle surrogate data: Testing for dynamics in fluctuating data with trends“, *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.*, sv. 72, izd. 5, str. 1–6, 2005, doi: 10.1103/PhysRevE.72.056216.
- [130] J. Theiler, S. Eubank, A. Longtin, B. Galdrikian, i J. Doynne Farmer, „Testing for nonlinearity in time series: the method of surrogate data“, *Phys. D Nonlinear Phenom.*, sv. 58, izd. 1–4, str. 77–94, 1992, doi: 10.1016/0167-2789(92)90102-S.
- [131] T. E. Hoff i R. Perez, „Modeling PV fleet output variability“, *Sol. Energy*, sv. 86, izd. 8, str. 2177–2189, 2012, doi: 10.1016/j.solener.2011.11.005.
- [132] E. M. Tonita, A. C. J. Russell, C. E. Valdivia, i K. Hinzer, „Optimal ground coverage ratios for tracked, fixed-tilt, and vertical photovoltaic systems for latitudes up to 75°N“, *Sol. Energy*, sv. 258, izd. April, str. 8–15, 2023, doi: 10.1016/j.solener.2023.04.038.
- [133] W. F. Holmgren, C. W. Hansen, i M. A. Mikofski, „Pvlib Python: a Python Package for Modeling Solar Energy Systems“, *J. Open Source Softw.*, sv. 3, izd. 29, str. 884, 2018, doi: 10.21105/joss.00884.
- [134] D. Faiman, „Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules“, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, sv. 16, str. 307–315, 2008, doi: <https://doi.org/10.1002/pip.813>.
- [135] F. Bañuelos-Ruedas, C. Angeles-Camacho, i S. Rios-Marcuello, „Analysis and validation of the methodology used in the extrapolation of wind speed data at different heights“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, sv. 14, izd. 8, str. 2383–2391, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2010.05.001.
- [136] K. Anderson i K. Perry, „Estimating Subhourly Inverter Clipping Loss from Satellite-Derived Irradiance Data“, *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, str. 1433–1438, 2020, doi: 10.1109/PVSC45281.2020.9300750.
- [137] „Data Logger Meteo-40 User’s Manual“. Ammonit Measurement GmbH, Berlin, 2022, [Na internetu]. Dostupno na: <https://archive.ammonit.com/archive/manuals/approved/Meteo-40-en.pdf>.
- [138] A. R. Nejad i ostali, „Wind turbine drivetrains: State-of-the-art technologies and future development trends“, *Wind Energy Sci.*, sv. 7, izd. 1, str. 387–411, 2022, doi: 10.5194/wes-7-387-2022.
- [139] D. Vrielmann, „Hybrid parks – new opportunities with multi-technology facilities“, 2021. <https://group.vattenfall.com/press-and-media/newsroom/2021/hybrid-parks--new-opportunities-with-multi-technology-facilities>.

PRILOZI

Prilog A Varijanca nekoreliranih vremenskih serija zbirne proizvodnje vjetroagregata

Prilog B Odbačena proizvodnja hibridne elektrane 25,6 MW/25,6 MWp i $P_{max}=35,7$ MW (siječanj i veljača)

Prilog C Odbačena proizvodnja hibridne elektrane 25,6 MW/25,6 MWp i $P_{max}=35,7$ MW (rujan – studeni)

PRILOG A

Varijanca nekoreliranih vremenskih serija zbirne proizvodnje vjetroagregata

Razmatraju se dva VA čije su vremenske serije proizvedene snage opisane s $P_{VA1}=\{P_{VA1t}\}$ i $P_{VA2}=\{P_{VA2t}\}$, $t=1,2,3,\dots,T$, gdje je T duljina vremenske serije snage, a varijance $\sigma_{VA1}^2 = \text{Var}(P_{VA1})$ i $\sigma_{VA2}^2 = \text{Var}(P_{VA2})$. Suma vremenskih serija $P_{VA1+2}=P_{VA1}+P_{VA2}$ odnosi se na zbirnu proizvodnju dva VA.

Koristeći osnovno svojstvo varijance, $\text{Var}(aX)=a^2\text{Var}(X)$, gdje je a konstanta, varijanca sume normaliziranih vremenskih serija proizvedene snage dvaju VA može se formulirati na sljedeći način:

$$\text{Var}\left(\frac{P_{VA1+2}}{P_{n1} + P_{n2}}\right) = \frac{1}{(P_{n1} + P_{n2})^2} \cdot \text{Var}(P_{VA1+2}) = \frac{1}{(P_{n1} + P_{n2})^2} \cdot \sigma_{VA1+2}^2 \quad (\text{A.1})$$

gdje su:

P_{n1} , P_{n2} nazivne snage VA1 i VA2, respektivno.

Varijanca zbirne proizvodnje dva VA može se raspisati kao suma varijanci proizvedene snage pojedinačnih VA i dvostruke kovarijanse σ_{VA12}^2 :

$$\sigma_{VA1+2}^2 = \sigma_{VA1}^2 + \sigma_{VA2}^2 + 2\sigma_{VA12}^2 \quad (\text{A.2})$$

Kovarijanca nekoreliranih vremenskih serija jednaka je nuli, $\sigma_{VA12}^2 = 0$. Ako se pretpostave jednake nazivne snage VA i varijance VA, uvrštavajući (A.2) u (A.1), slijedi da se varijanca nekoreliranih vremenskih serija zbirne proizvodnje VA može raspisati kao:

$$\frac{1}{(P_{n1} + P_{n2})^2} \cdot \sigma_{VA1+2}^2 = \frac{1}{4P_{n1}^2} \cdot 2\sigma_{VA1}^2 = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{VA1}^2}{P_{n1}^2} = \frac{1}{2} \text{Var}\left(\frac{P_{VA1}}{P_{n1}}\right) \quad (\text{A.3})$$

Dakle, vrijedi da je varijanca normalizirane zbirne proizvodnje dviju VA dvostruko manja od varijance normalizirane vremenske serije proizvedene snage jednog VA:

$$\text{Var}\left(\frac{P_{VA1+2}}{P_{n1} + P_{n2}}\right) = \frac{1}{2} \text{Var}\left(\frac{P_{VA1}}{P_{n1}}\right) \quad (\text{A.4})$$

Analogno se može pokazati da će varijanca N_{VA} nekoreliranih vremenskih serija proizvodnje VA slijediti isti zakon, tj. biti će $1/N_{VA}$ puta umanjena u odnosu na varijancu jednog VA. Jasno je da će u slučaju upotrebe standardne devijacije odnos biti $N_{VA}^{-1/2}$.

PRILOG B

Odbačena proizvodnja hibridne elektrane 25,6 MW/25,6 MWp i Pmax=35,7 MW (siječanj i veljača)

Vremenska rezolucija SE	1s	1.36%	1.36%	1.36%	1.36%	1.36%	1.36%	1.36%	1.35%	1.34%	1.33%	1.30%	1.26%
	2s	1.36%	1.36%	1.36%	1.36%	1.36%	1.36%	1.36%	1.35%	1.34%	1.33%	1.30%	1.26%
	5s	1.36%	1.36%	1.36%	1.36%	1.36%	1.36%	1.36%	1.35%	1.34%	1.33%	1.30%	1.26%
	10s	1.36%	1.36%	1.36%	1.36%	1.36%	1.36%	1.36%	1.35%	1.34%	1.33%	1.30%	1.26%
	30s	1.36%	1.36%	1.36%	1.36%	1.36%	1.36%	1.36%	1.35%	1.34%	1.33%	1.30%	1.26%
	1min	1.36%	1.36%	1.36%	1.36%	1.36%	1.36%	1.35%	1.35%	1.34%	1.33%	1.29%	1.26%
	2min	1.36%	1.36%	1.36%	1.36%	1.36%	1.35%	1.35%	1.35%	1.34%	1.33%	1.29%	1.26%
	5min	1.34%	1.34%	1.34%	1.34%	1.34%	1.34%	1.34%	1.33%	1.32%	1.32%	1.28%	1.25%
	10min	1.33%	1.33%	1.33%	1.33%	1.33%	1.33%	1.32%	1.32%	1.31%	1.30%	1.27%	1.24%
	15min	1.32%	1.32%	1.31%	1.31%	1.31%	1.31%	1.31%	1.31%	1.30%	1.29%	1.25%	1.23%
	30min	1.26%	1.26%	1.26%	1.26%	1.26%	1.26%	1.25%	1.25%	1.24%	1.23%	1.20%	1.17%
	1h	1.20%	1.20%	1.20%	1.20%	1.20%	1.19%	1.19%	1.19%	1.18%	1.17%	1.14%	1.12%
		1s	2s	5s	10s	30s	1min	2min	5min	10min	15min	30min	1h
		Vremenska rezolucija VE											

Slika B-1 Odbačena proizvodnja pri različitim vremenskim rezolucijama u hibridnoj elektrani instalirane snage 25,6 MW/25,6 MWp i priključnoj snazi 35,7 MW za period od siječnja do veljače

PRILOG C

Odbačena proizvodnja hibridne elektrane 25,6 MW/25,6 MWp i Pmax=35,7 MW (rujan – studeni)

Vremenska rezolucija SE	1s	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.01%	1.00%	0.98%	0.96%
	2s	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.01%	1.00%	0.98%	0.96%
	5s	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.01%	1.00%	0.98%	0.96%
	10s	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.01%	1.00%	0.98%	0.96%
	30s	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.01%	1.00%	0.98%	0.96%
	1min	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.01%	1.00%	0.98%	0.96%
	2min	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.02%	1.01%	1.01%	1.00%	0.97%	0.96%
	5min	1.01%	1.01%	1.01%	1.01%	1.01%	1.01%	1.01%	1.00%	1.00%	0.99%	0.96%	0.94%
	10min	0.99%	0.99%	0.99%	0.99%	0.99%	0.99%	0.99%	0.98%	0.98%	0.97%	0.94%	0.92%
	15min	0.98%	0.98%	0.98%	0.98%	0.98%	0.98%	0.98%	0.98%	0.97%	0.96%	0.94%	0.92%
	30min	0.95%	0.95%	0.95%	0.95%	0.94%	0.94%	0.94%	0.94%	0.93%	0.92%	0.90%	0.88%
	1h	0.91%	0.91%	0.91%	0.91%	0.91%	0.91%	0.91%	0.90%	0.90%	0.89%	0.87%	0.85%
			1s	2s	5s	10s	30s	1min	2min	5min	10min	15min	30min
		Vremenska rezolucija VE											

Slika C-1 Odbačena proizvodnja pri različitim vremenskim rezolucijama u hibridnoj elektrani instalirane snage 25,6 MW/25,6 MWp i priključnoj snazi 35,7 MW za period od rujna do studenog

ŽIVOTOPIS

Antun Meglič je rođen 7. rujna 1995. godine u Zagrebu. Nakon završetka osnovne i srednje elektrotehničke škole u Zagrebu, 2014. godine upisuje sveučilišni preddiplomski studij Elektrotehnike i informacijske tehnologije na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu. Diplomski studij Elektrotehnike, smjer Elektroenergetski sustavi na istom fakultetu, završava 2017. godine. Diplomirao je 2019. godine i stekao naziv magistar inženjer elektrotehnike.

Tijekom studija, četiri puta je nagrađivan za uspjeh na fakultetu. Dobitnik je dvije Dekanove nagrade (lipanj 2017. i lipanj 2019.), nagrade za najuspješnijeg studenta preddiplomskog sveučilišnog studija Elektrotehnika i informacijska tehnologija (veljača 2018.) kao i diplomskog sveučilišnog studija Elektrotehnike u veljači 2020., uz najveću pohvalu (summa cum laude).

Od travnja 2016. do listopada 2019. godine zaposlen je preko studentskog ugovora u firmi Fractal d.o.o., specijaliziranoj za konzalting i inženjering u elektroenergetici, sa sjedištem u Splitu. U rujnu 2018. godine odradio je jednomjesečnu plaćenu praksu u firmi Fenecon GmbH u Deggendorfu, Njemačka. Od listopada 2019. godine do danas trajno je zaposlen kao inženjer za analize elektroenergetskih sustava u firmi Fractal. Tijekom zaposlenja do danas objavio je preko 50 specijaliziranih studija i elaborata u elektroenergetici.

Poslijediplomski doktorski studij Elektrotehnike i informacijske tehnologije na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu upisuje u listopadu 2019. godine kao student s dijelom radnog vremena. Od listopada 2020. godine angažiran je kao vanjski suradnik na istom fakultetu u izvođenju laboratorijskih vježbi iz kolegija Inženjerska ekonomika i Opća energetika na diplomskom studiju Elektrotehnike.

Tijekom poslijediplomskog studija, kao glavni autor ili koautor, objavio je ukupno četiri znanstvena rada, od kojih su dva znanstvena rada objavljena u časopisima A kategorije, indeksiranim u WoSCC bazi, te dva znanstvena rada objavljena u zborniku radova s međunarodnog znanstvenog skupa.

CURRICULUM VITAE

Antun Meglič was born on September 7, 1995, in Zagreb. After completing elementary and secondary school in electrical engineering in Zagreb, he enrolled in the undergraduate program in Electrical Engineering and Information Technology at the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture in Split in 2014. He completed the undergraduate program in 2017 and then enrolled in the graduate program in Electrical Engineering, specializing in Electric Power Systems, at the same faculty. He completed his graduate studies in 2019 and earned the title of Master of Electrical Engineering.

During his studies, he was awarded four times for academic excellence. He received the Dean's Award twice (June 2017 and June 2019) and was also the recipient of the award for the most successful student at the undergraduate university study program in Electrical Engineering and Information Technology (February 2018), as well as the most successful student at the graduate university study program in Electrical Engineering in February 2020, with highest honors (summa cum laude).

From April 2016 to October 2019, he was employed through a student contract at Fractal d.o.o., a company specializing in electrical engineering and consulting, based in Split. In September 2018, he completed a one-month paid internship at Fenecon GmbH in Deggendorf, Germany. Since October 2019, he is permanently employed as an engineer for electric power system analysis at Fractal d.o.o. During his employment, he has published over 50 specialized studies and reports in the field of electrical power engineering.

He enrolled in the postgraduate doctoral program in Electrical Engineering and Information Technology at the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering, and Naval Architecture at the University of Split in October 2019, as a part-time Ph.D. student. Since October 2020, he has been engaged as an external collaborator at the same faculty, involved in conducting laboratory exercises in courses Engineering Economics and General Energetics at the graduate level.

During his postgraduate studies, as the main author or co-author, he has published a total of four scientific papers, two of which are journal articles, indexed in the WoSCC database, and two are scientific papers published in the proceedings of an international scientific conferences.