

Nikolina Mršo, univ. mag. ing. el.
HEP d.d.
nmrso@hep.hr

Ružica Kljajić, dr. sc.
FERIT, Osijek
ruzica.kljajic@ferit.hr

Krešimir Fekete, izv. prof. dr. sc.
FERIT, Osijek
kresimir.fekete@ferit.hr

Danijel Topić, izv. prof. dr. sc.
FERIT, Osijek
danijel.topic@ferit.hr

IZRAČUN OČEKIVANE GODIŠNJE PROIZVODNJE IZ FOTONAPONSKE ELEKTRANE UZ UZIMANJE U OBZIR POUZDANOSTI KOMPONENTI

SAŽETAK

Očekivana godišnja proizvodnja fotonaponske elektrane u prvom redu ovisi o intenzitetu Sunčeva zračenja za lokaciju elektrane i meteorološkim uvjetima tijekom godine (zasjenjenje fotonaponskih modula uzrokovano oblacima). U ovom radu nastoji se istražiti utjecaj kvarova komponenti fotonaponskog sustava veće snage (100 kW) na očekivanu godišnju proizvodnju električne energije. Za izračun očekivane godišnje proizvodnje električne energije u obzir je uzeta idealna situacija intenziteta Sunčeva zračenja gdje je zanemaren utjecaj meteoroloških prilika. Kako bi se istražio utjecaj kvarova komponenti fotonaponskog sustava, uzeti su podaci o zastojima komponenti i vremenima trajanja popravka iz dostupne literature te je uz dane pretpostavke izračunata očekivana godišnja proizvodnja za nekoliko scenarija različitog vremena trajanja popravka. Iako rezultati proračuna upućuju na mali utjecaj kvarova na očekivanu godišnju proizvodnju električne energije, rad daje uvid u metodologiju za uzimanje u obzir kvarova kao i temelje za daljnje istraživanje utjecaja pouzdanosti fotonaponskog sustava na očekivanu godišnju proizvodnju energije.

Ključne riječi: fotonaponska elektrana, očekivana proizvodnja, intenzitet kvarova, pouzdanost

CALCULATION OF THE EXPECTED ANNUAL PRODUCTION FROM THE PHOTOVOLTAIC POWER PLANT TAKING INTO CONSIDERATION THE RELIABILITY OF THE COMPONENTS

SUMMARY

The expected yearly production of a photovoltaic power plant primarily depends on the intensity of solar radiation for the power plant location and weather conditions during the year (shading of photovoltaic modules caused by clouds). This paper investigates the impact of photovoltaic system components failures (inverter, modules, transformer, etc.) of 100 kW photovoltaic power plant on the expected yearly electricity production. For calculating the expected yearly electricity production, an ideal situation of solar radiation intensity was taken into account, where the influence of weather conditions was neglected. To investigate the impact of failures of photovoltaic system components, data on component downtime and repair times were taken from the available literature, and with the given assumptions, the expected yearly production was calculated for several scenarios with different repair times. Although the calculation results indicate a small impact of failures on the expected annual production of electricity, the paper provides insight into the methodology for taking these failures into

account, as well as the foundations for further research into the impact of photovoltaic system reliability on the expected annual production of energy.

Key words: photovoltaic power plant, expected energy production, failure rate, reliability

1. UVOD

Pouzdanost je ključna za planiranje i dugoročno vođenje elektroenergetskog sustava kako bi se osigurala neprekidna isporuka električne energije uz poštivanje ograničenja definiranih standardima kvalitete električne energije. Svaki prekid opskrbe stvara ekonomske gubitke te se stoga treba voditi računa o pravovremenom održavanju sustava, zamjeni ili popravku dotrajalih komponenti i skraćivanju vremena isključenja potrošača [1]–[3]. S tehničkog i ekonomskog aspekta nije moguće osigurati stalno napajanje električnom energijom, međutim, nužno je omogućiti kupcima zadovoljavajuću razinu pouzdanosti napajanja. Pouzdanost napajanja odnosi se na sposobnost elektroenergetskog sustava da kontinuirano opskrbljuje korisnike prema njihovim zahtjevima, uzimajući u obzir planirane i neplanirane zastoje. Za iskazivanje pouzdanosti se koriste različiti pokazatelji koji prikazuju broj prekida u određenom vremenskom razdoblju i ukupno trajanje prekida, kao i neisporučenu energiju. Za poboljšanje pouzdanosti distribucijske mreže, operateri distribucijskog sustava provode mjere poput rekonfiguracije sustava [4], [5], instalacije sustava pohrane energije [6], integracije obnovljivih izvora energije [7], korištenje električnih vozila s mogućnošću punjenja/praznjenja (engl. *Vehicle-to-grid*, V2G) [8] ili upravljanja potražnjom (engl. *Demand-Side Management*, DM) [9]. Posljednje dvije opcije imaju veliki potencijal za poboljšanje indeksa pouzdanosti distribucijskog sustava.

Moderne distribucijske mreže zbog visoke integracije obnovljivih izvora energije se suočavaju s brojnim izazovima kako bi se osigurala neprekinuta opskrba potrošača. Osnovni problem koji se javlja u mrežama s visokim udjelom obnovljivih izvora su prekidi uzrokovani stohastičnošću proizvodnje, što u konačnici utječe na pokazatelje pouzdanosti, prvenstveno na neisporučenu energiju u sustavu [10]. Pouzdanost distribucijske mreže s distribuiranim izvorima se razmatra u brojnim radovima, primjerice za sustave s integriranim vjetroelektranama i fotonaponskim elektranama analiza je predstavljena u radu [11]. Prema tom izvoru, obnovljivi izvori doprinose poboljšanju pouzdanosti iako se značajnije poboljšanje pokazatelja (neisporučene energije i vjerojatnost gubitka opterećenja) postiže unaprijedom strukture mreže. U mrežama s visokim udjelom obnovljivih izvora energije, posebno s fotonaponskim elektranama, zastoji se prema podacima dostupnim u literaturi događaju jako rijetko (Tablica 1), a najčešće nije poznato vrijeme otklanjanja zastoja [12], [13].

Tablica 1. Učestalost kvarova elemenata fotonaponske elektrane prema [12] i [13]

Element	Učestalost kvara (kvar/godina u 10^{-6})
FN modul	0,0046 - 26
Izmjenjivač	0,46 - 180
Prekidači i ostala zaštitna oprema	0,034 - 5,7
Baterijski sustavi i kontroleri punjenja	6,4 - 44

Pored navedenih izvora, u literaturi [14] se također navode pokazatelji i vrijeme pojave kvara fotonaponskih elektrana. Trenutak pojave kvara također ima značajan utjecaj na pokazatelje pouzdanosti. Kvar tokom noći ili tokom oblačnog dana će imati značajno manji utjecaj na ukupnu proizvedenu energiju nego isti kvar tokom sunčanog vremena u vrijeme vršne proizvodnje elektrane. Također, kvarovi mogu varirati od jednostavnog prekida komunikacije u djelu nadzornog sustava [15] koji se mogu otkloniti u relativno kratkom periodu do fizičkih oštećenja opreme (npr. modula) [16],[17] što će rezultirati značajno dužim vremenom otklanjanja kvara.

U ovom radu analizirana je pouzdanost i raspoloživost fotonaponske elektrane snage 100 kW čiji su moduli od polikristalnog silicija. Na temelju podataka iz sustava PV GIS [18] su određene godišnje vrijednosti intenziteta Sunčevog zračenja za svaki sat te je određena prosječna snaga i prosječna proizvedena energija elektrane bez uzimanja u obzir mogućih zastoja elektrane. Osnovni scenarij, u kojemu se računa prosječna proizvodnja elektrane je uspoređen sa tri dodatna scenarija kada se pretpostave tri različita vremena zastoja elektrane i za svaki scenarij je izračunat koeficijent iskorištenja instalirane snage elektrane (engl. *capacity factor*, CF) te su rezultati prikazani grafički. Rad se sastoji iz četiri poglavlja sa uvodom kao prvim poglavljem. U drugom poglavlju je opisana matematička osnova izračuna energije proizvedene u fotonaponskoj elektrani. Rezultati proračuna su predstavljani u trećem

poglavlju skupa s opisom korištene opreme. U četvrtom poglavlju su izvučeni osnovni zaključci istraživanja i opisane su smjernice za buduća istraživanja.

2. MATEMATIČKA OSNOVA PRORAČUNA VJEROJATNOSTI PROIZVODNJE FOTONAPONSKE ELEKTRANE

Kao osnovni podatak za izračun izlazne snage fotonaponske elektrane je intenzitet Sunčeva zračenja koji se mijenja ovisno o danu, godišnjem dobu, meteorološkim uvjetima i sl. Za potrebe ovog rada, podaci o intenzitetu Sunčeva zračenja preuzimaju se sa internetske stranice *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)* [18]. Preuzeti podaci se zatim raspodjeljuju u razrede. Broj razreda određuje se uz pomoć Sturgesove formule [19]:

$$n = 1 + \log_2(k) \quad (1)$$

Gdje je

n - broj razreda u koje se sortiraju podaci

k – ukupni broj podataka

Formula (1) temelji se na pretpostavci da podaci slijede normalnu razdiobu i da je veličina uzorka umjerena. Sturgesova formula vrlo je pouzdana za određivanje broja razreda u histogramu kada se radi s malim ili srednje velikim skupovima podataka koji su približno normalno distribuirani. Pokazatelji da je ova metoda pouzdana su dani u lit. [19], a glavne odlike su:

1. Jednostavnost primjene - formula je jednostavna za izračunavanje i ne zahtijeva dodatne informacije o distribuciji podataka osim veličine uzorka
2. Teorijska osnova - bazira se na logaritamskoj funkciji, koja reflektira odnos između broja razreda i veličine uzorka, čime se osigurava da histogram nije previše "grub" ni previše "gladak"
3. Standardna praksa - široko se koristi u statističkim i analitičkim alatima, čime je postala dio standardnog pristupa analizi podataka
4. Brza - omogućuje brzo određivanje broja klasa, što je korisno u početnim fazama analize podataka
5. Konzistentna - pruža dosljedne rezultate za skupove podataka koji imaju relativno uniformnu distribuciju
6. Manje osjetljiva – u usporedbi s nekim alternativnim metodama, manje je osjetljiva na ekstremne vrijednosti ili šum u podacima

Raspon jednog razreda r , određuje se pomoću formule (2). Pretpostavljeno je da svi razredi imaju jednaki raspon.

$$r = \frac{\max(k) - \min(k)}{n} \quad (2)$$

Gdje je

$\max(k)$ - iznos najveće vrijednosti unutar raspona

$\min(k)$ - iznos najmanje vrijednosti unutar raspona

Prema literaturi [10], vjerojatnost je mjera šanse ili mogućnosti da se neki događaj dogodi u kontekstu određenog eksperimenta. Ako se želi izračunati vjerojatnost da će intenzitet Sunčeva zračenja biti u razredu i , može se koristiti slijedeći izraz:

$$p(i) = \frac{P(i)}{8760} \quad (3)$$

Pri čemu $P(i)$ označava broj podataka u razredu i , 8760 prikazuje broj podataka u cijeloj godini, a $p(i)$ vjerojatnost da će intenzitet Sunčeva zračenja biti u razredu i .

Za izračun izlazne snage fotonaponske elektrane, potrebno je pored intenziteta Sunčevog zračenja poznavati i površinu fotonaponskih modula te učinkovitost fotonaponskog sustava (najznačajnije komponente su fotonaponski moduli i izmjenjivač). Rasponi izlazne snage fotonaponske elektrane su podijeljeni jednako kao i za intenzitet Sunčevog zračenja, a preko izraza (4) je dana veza između intenziteta Sunčeva zračenja G i izlazne snage elektrane P :

$$P = G \cdot A \cdot \eta_{PV} \cdot \eta_I \quad (4)$$

Gdje je:

- G - intenzitet Sunčevog zračenja u W/m^2
- A - površina fotonaponskih modula u m^2

- η_{PV} - učinkovitost fotonaponskog modula
- η_I - učinkovitost izmjenjivača

Snazi dobivenoj s pomoću izraza (4) se pridjeljuje jednaka vjerojatnost pojave kao i vjerojatnosti intenziteta Sunčeva zračenja. Međutim, raspodjela snaga po vjerojatnostima pojave ne daje dovoljno informacija o proizvodnji električne energije nego samo o rasponima unutar kojih elektrana može raditi. Pokazatelj koji ukazuje na vjerojatnu godišnju proizvodnju je prosječna proizvedena energija fotonaponskih modula W_p za jednu godinu, koja se određuje prema izrazu (5)

$$W_p = \sum_{i=1}^n (p_i \cdot P_{sr} \cdot 8760) \quad (5)$$

Gdje je:

- p_i - vjerojatnost pojave i -tog razreda snage
- P_{sr} - srednja snaga razreda [kW]

Srednja snaga razreda se računa kao

$$P_{sr} = \frac{P_{i-1} + P_i}{2} \quad (6)$$

Gdje je:

- P_{i-1} - niža vrijednost snage razreda [kW]
- P_i - viša vrijednost snage razreda [kW]

Iz izraza (5) i (6) se može odrediti koeficijent iskorištenja instalirane snage elektrane, CF kao

$$CF = \frac{W_p}{P_{ins} \cdot 8760} \quad (7)$$

Gdje je

P_{ins} - instalirana snaga elektrane u kW

Prema prethodnom proračunu, koristeći izraze (5) - (7), dobije se očekivana proizvedena energija fotonaponske elektrane i CF . U tom proračunu zanemaren je utjecaj zastoja elektrane uslijed kvarova zbog kojih će proizvedena energija biti niža. Proizvedena energija W_z se u tom slučaju računa prema izrazu

$$W_z = \sum_{i=1}^n (p_i \cdot P_{sr} \cdot T_z) \quad (8)$$

pri čemu je T_z vrijeme rada elektrane u satima i računa se kao razlika ukupnog broja sati u godini i sati trajanja zastoja elektrane t_u :

$$T_z = 8760 - t_u \quad (9)$$

Analogno prethodnim razmatranjima, koeficijent iskorištenja instalirane snage elektrane CF se u slučaju zastoja računa kao

$$CF = \frac{W_z}{P_{ins} \cdot 8760} \quad (10)$$

3. PRIKUPLJANJE I OBRADA PODATAKA O INTENZITETU SUNČEVA ZRAČENJA

Podaci o intenzitetu Sunčeva zračenja su preuzeti za svaki sat u 2023. godini. Postavljeni su parametri prikazani slikom 1. Odabrana lokacija je grad Osijek, nagib panela je 34° te se kao rezultat dobiju podaci o intenzitetu Sunčeva zračenja za svaki sat u godini.

HOURLY RADIATION DATA

Solar radiation database* PVGIS-SARAH3

Start year* 2023 End year* 2023

Mounting type*:

☒ Fixed ☐ Vertical axis ☐ Inclined axis ☐ Two axis

Slope [°] 34 ☐ Optimize slope

Azimuth [°] 10 ☐ Optimize slope and azimuth

☒ PV power

PV technology* Crystalline silicon

Installed peak PV power [kWp]* 100

System loss [%]* 2

☐ Radiation components

Slika 1. Vrijednosti postavljenih parametara za preuzimanje podataka o sunčevom zračenju za grad Osijek s PV GIS-a [18]

Ovi su podaci obrađeni pomoću programa *Python* te su raspoređeni u razrede koji su definirani pomoću Sturgesove formule. Skup 8760 podataka se prema izrazu (1) dijeli na

$$k = 1 + \log_2(8760) = 14,1$$

odnosno zaokružuje se na prvi veći broj, čime se dobije 15 razreda.

Minimalna vrijednost intenziteta Sunčeva zračenja je 0 W/m^2 , dok je maksimalna $1069,65 \text{ W/m}^2$. Raspon razreda se definira prema izrazu (2)

$$r = \frac{1069,65 - 0}{15} = 71,31 \text{ W/m}^2$$

Razredi intenziteta Sunčeva zračenja, broj pojedinačnih podataka u svakom razredu kao i vjerojatnost da će intenzitet Sunčeva zračenja biti u danom razredu, prikazani su u tablici 2. Razred sa najviše podataka je za raspon zračenja između 0 i $71,31 \text{ W/m}^2$. Kako se povećava iznos intenziteta Sunčevog zračenja, smanjuje se učestalost njegove pojave (razredi koji obuhvaćaju veće intenzitete Sunčeva zračenja, imaju manji broj podataka). Iz prikupljenih i obrađenih podataka, moguće je napraviti proračun vjerojatnosti pojave pojedinog iznosa intenziteta Sunčevog zračenja koristeći izraz (3). Vjerojatnosti se nalaze između dvije granične vrijednosti, najveće od $60,6\%$ za male intenzitete zračenja i $0,73\%$, koja je ujedno vjerojatnost pojave najvećeg zračenja. Vjerojatnosti pojave ostalih vrijednosti su između $1,92\%$ i $6,67\%$ iako će elektrana većinu vremena u kojem radi biti u nekom od tih raspona snaga.

Tablica 2. Obradeni podaci o intenzitetu Sunčevog zračenja

	Razredi intenziteta Sunčevog zračenja [W/m ²]	Broj podataka	Vjerojatnost [%]
1.	0 – 71,31	5310	60,6%
2.	71,31 – 142,62	584	6,67%
3.	142,62 – 213,93	345	3,94%
4.	213,93 – 285,24	309	3,53%
5.	285,24 – 356,55	226	2,58%
6.	356,55 – 427,86	179	2,04%
7.	427,86 – 499,17	265	3,03%
8.	499,17 – 570,48	207	2,36%
9.	570,48 – 641,79	168	1,92%
10.	641,79 – 713,10	272	3,11%
11.	713,10 – 784,41	180	2,05%
12.	784,41 – 855,72	236	2,70%
13.	855,72 – 927,03	222	2,53%
14.	927,03 – 998,34	184	2,10%
15.	998,34 – 1069,66	73	0,73%

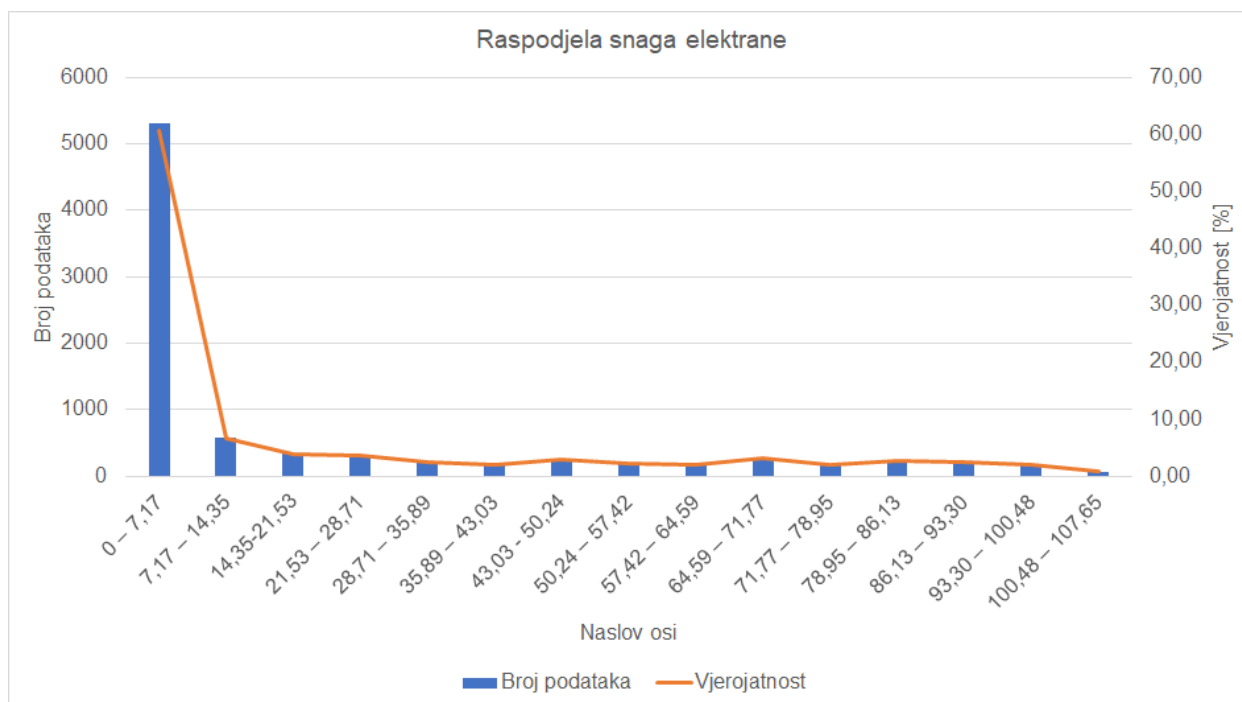
Odabrana fotonaponska elektrana je nazivne instalirane snage 100 kW, a odabrani fotonaponski moduli su izrađeni od polikristalnog silicija proizvođača [20]. Snaga pojedinačnog modula iznosi 330 W te je pretpostavljeno 305 modula što daje ukupnu instaliranu snagu fotonaponskih modula od 100,65 kW. Učinkovitost izmjenjivača te gubici u spojnim kabelima su zanemareni pa je ukupna instalirana snaga fotonaponske elektrane upravo 100,65 kW. Ostali podaci modula su dani u tablici 3.

Tablica 3. Podaci polikristalnog modula [20]

Parametar	Vrijednost
Vršna snaga modula P_{MPP} [W]	330
Struja kratkog spoja I_{SC} [A]	8,87
Napon praznog hoda U_{OC} [V]	46,08
Nazivna struja I_{MPP} [A]	8,50
Nazivni napon U_{MPP} [V]	38,86
Učinkovitost modula [%]	17,01
Dimenzije modula [mm]	1956x992x40

Na temelju odabranih modula i njihova broja prema izrazu (4) izračunati su rasponi izlazne snage elektrane koji odgovaraju razredima intenziteta Sunčeva zračenja. Pri izračunu snage se uzima učinkovitost izmjenjivača od 100%, te se prema dimenzijama modula može odrediti ukupna površina, koja iznosi 591,81 m². Rasponi snaga se određuju prema izrazu (4) te se raspoređuju u razrede po istom izrazu kao i za intenzitet Sunčeva zračenja. Kao i za zračenje, najveća je učestalost pojave snage od 0 kW do 7,17 kW, a za veće snage se smanjuje učestalost pojave.

Raspodjela izlazne snage fotonaponske elektrane prema razredima je prikazana slikom 2. Dobiveni podaci ovise isključivo o odabranoj tehnologiji i pri fiksnoj kuti postavljanja.



Slika 2. Raspodjela izlazne snage fotonaponske elektrane prema razredima

3. PRORAČUN OČEKIVANE GODIŠNJE PROIZVODNJE IZ FOTONAPONSKE ELEKTRANE

Proračun ukupne očekivane proizvodnje fotonaponske elektrane je proveden za četiri scenarija. Koristeći podatke za prosječan intenzitet Sunčeva zračenja razreda, određene su prosječne snage elektrane za svih 15 razreda. Zatim je u prvom scenariju izračunata očekivana godišnja proizvodnja fotonaponske elektrane bez uzimanja u obzir zastoja i kvarova elektrane. Taj scenarij je ujedno i osnovni u odnosu na koji se uspoređuju scenariji 2, 3 i 4. U scenariju 2 uzima se u obzir pojava kvarova, čije trajanje je preuzeto iz literature te je određena očekivana godišnja proizvodnja energije i koeficijent iskorištenja instalirane snage fotonaponske elektrane, CF . U trećem scenariju izračunava se očekivana godišnja proizvodnja energije fotonaponske elektrane ako se pretpostavi da je vrijeme trajanja kvara značajno manje od vremena koje je uzeto kao referentno u scenariju 2. Kako na trajanje kvarova mogu utjecati razni vanjski čimbenici, poput vremena otkrivanja kvara, vrijeme popravka ili nabave rezervnih dijelova, u scenariju 4 se računa očekivana proizvedena energija ako je vrijeme trajanja kvara značajno duže od vremena u scenariju 2.

3.1. Scenarij 1 – Očekivana godišnja proizvodnja fotonaponske elektrane bez utjecaja kvarova

U osnovnom scenariju, pretpostavlja se da nema zastoja fotonaponske elektrane, odnosno računa se očekivana proizvedena električna energija prema raspodjeli snaga dobivenih prema izrazima (5) i (6). U tablici 7 su pored prosječnih izlaznih snaga za svaki razred prikazane i očekivana proizvedena energija za svaki razred kao i vjerojatnosti pojave određenog razreda. Kako je ranije navedeno, da bi se postigla snaga elektrane od 100 kW na pragu, potrebno je instalirati veći broj fotonaponskih modula. U zadnjem rasponu se dobije prosječna vrijednost izlazne snage od 104 kW, koja je nešto viša od stvarne instalirane snage elektrane stoga se pri proračunu uzima raspon koji je stvarno moguć, a to je između 100,48 kW i 100,65 kW (prosječno 100,56 kW).

Tablica 7. Očekivana proizvedena električna energija za svaki razred u scenariju 1

	Prosječna snaga elektrane po razredu [kW]	Vjerojatnost	Očekivana proizvedena energija za razrede [kWh]
1.	3,59	60,6%	19 036,35
2.	10,76	6,67%	6 283,84
3.	17,85	3,94%	6 158,25
4.	25,03	3,53%	7 734,27
5.	32,30	2,58%	7 299,80
6.	39,46	2,04%	7 063,34
7.	46,64	3,03%	12 358,28
8.	53,83	2,36%	11 142,81
9.	61,01	1,92%	10 248,84
10.	68,18	3,11%	18 544,96
11.	75,36	2,05%	13 564,80
12.	82,54	2,70%	19 479,44
13.	89,72	2,53%	19 916,73
14.	96,89	2,10%	17 827,76
15.	104,07	0,73%	7 341,25

Očekivana godišnja proizvodnja električne energije iz fotonaponske elektrane bez uzimanja u obzir pojave kvarova iznosi 184 256,21 kWh. Ako bi teorijski, elektrana instalirane snage 100 kW radila cijelu godinu punom snagom, ukupna proizvedena energija bi iznosila 876 000 kWh. Kada se te dvije vrijednosti uvrste u izraz (7), dobije se slijedeći koeficijent iskorištenja instalirane snage elektrane:

$$CF = \frac{184000,71}{100 \cdot 8760} = 21\%$$

3.2. Scenarij 2 – Očekivana godišnja proizvodnja fotonaponske elektrane uz uzimanje u obzir kvarova

Kako bi se uzela u obzir nedostupnost fotonaponske elektrane zbog kvarova, računa se prosječna nedostupnost pojedinog dijela fotonaponske elektrane, prvenstveno modula, izmijenjivača, transformatora i ostale spojne i priključne opreme. Podaci o prekidima i vremenima trajanja prekida se prikazuju različitim metodologijama, a tablicom 8 su prikazani podaci o vremenu trajanja prekida, dobiveni prema literaturi [21]–[23].

Tablica 8. Trajanje i učestalost kvarova po komponentama fotonaponskog sustava prema literaturi [21]–[23]

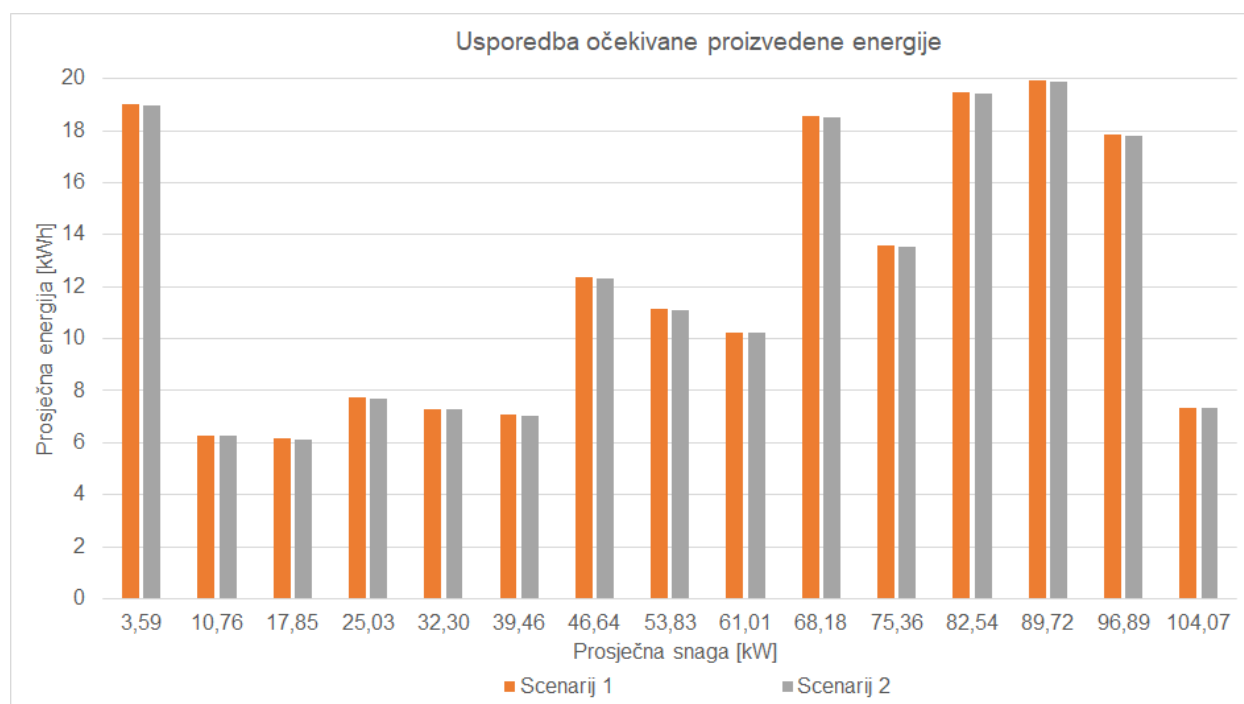
Komponenta	Prosječno vrijeme zastoja [sat/jedinici]
Fotonaponski modul	4
Izmijenjivač	0,75
Komunikacijska i mjerna oprema	6
Transformator	8
Kabeli i spojna oprema	4

Vrijeme popravka ovisi o veličini fotonaponske elektrane i njezinoj složenosti tako da elektrana spojena na transformatorsku stanicu ima dodatno vrijeme zastoja zbog vremena zastoja transformatora. Ukupno godišnje vrijeme zastoja t_u je prema podacima iz literature [21]–[23] oko 23 sata. Kada se uzme u obzir pojava kvarova, očekivana proizvedena električna energija iz fotonaponske elektrane se smanjuje ovisno o vremenu trajanja kvara, a računa se prema izrazima (8) i (9). Rezultati za pojedine razrede su prikazani tablicom 9.

Tablica 9. Očekivana proizvedena električna energija za svaki razred u scenariju 2

	Prosječna snaga elektrane po razredu [kW]	Vjerojatnost	Očekivana proizvedena energija uz uzimanje u obzir kvarova [kWh]
1.	3,59	60,6%	18 986,91
2.	10,76	6,67%	6 267,52
3.	17,85	3,94%	6 142,26
4.	25,03	3,53%	7 714,18
5.	32,30	2,58%	7 280,84
6.	39,46	2,04%	7 045,00
7.	46,64	3,03%	12 326,18
8.	53,83	2,36%	11 113,87
9.	61,01	1,92%	10 222,22
10.	68,18	3,11%	18 496,80
11.	75,36	2,05%	13 529,57
12.	82,54	2,70%	19 428,85
13.	89,72	2,53%	19 865,01
14.	96,89	2,10%	17 781,46
15.	104,07	0,73%	7 322,18

Usporedba očekivane proizvedene energije je prikazana slikom 3. Vrijeme zastoja je 23 sata, što na godišnjoj razini predstavlja 0,26% vremena tokom kojih elektrana nije proizvodila energiju, pa stoga ne postoji značajna razlika u iznosima proizvedene energije za pojedini razred. Međutim, ako bi se kvar dogodio tokom perioda vršne proizvodnje elektrane, iznos očekivane energije koji ne bi bio proizveden bi bio značajno veći.



Slika 3. Usporedba očekivane proizvodnje energije po razredima za scenarij 1 i scenarij 2

Kada se uzmu u obzir utjecaji zastoja i kvara komponenti, smanjuje se ukupna očekivana godišnja proizvedena energija sa 184 MWh na 183,5 MWh, što je smanjenje za 0,26% dok se koeficijent iskorištenja instalirane snage CF, koji se određuje s pomoću izraza (10), smanjuje na 20,95%.

3.3. Scenarij 3 - Očekivana godišnja proizvodnja fotonaponske elektrane uz uzimanje u obzir kvarova i kraće vrijeme zastoja

Prosječna vremena zastoja elektrane su određene prema preporukama u literaturi [21]–[23]. Međutim, vrijeme zastoja pojedine komponente može biti značajno kraće ukoliko se radi o nekom prolaznom kvaru koji se brzo uoči i otkloni. Stoga se u scenariju 3 vrijeme zastoja pojedine komponente uzima dvaputa manje nego u scenariju 2, kako je prikazano tablicom 10.

Tablica 10. Trajanje kvarova po komponentama fotonaponskog sustava

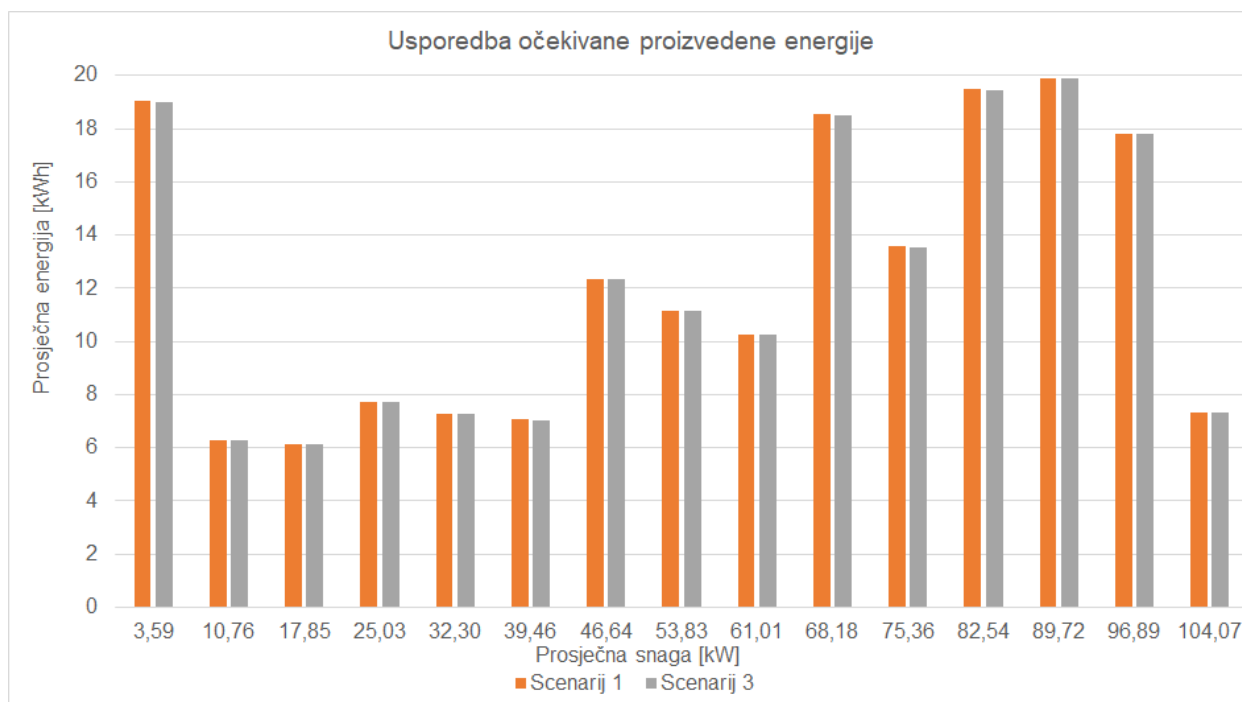
Komponenta	Prosječno vrijeme zastoja [sat/jedinici]
Fotonaponski modul	2
Inverter	0,35
Komunikacijska i mjerna oprema	3
Transformator	4
Kabeli i spojna oprema	2

U ovom slučaju ukupno vrijeme zastoja t_u je oko 11 sati. Smanjenjem trajanja kvarova je očekivana proizvedena energija iz elektrane nešto veća nego u scenariju 2. Pokazatelji za scenarij 2 su prikazani u tablici 11.

Tablica 11. Očekivana proizvedena električna energija za svaki razred u scenariju 3

	Prosječna snaga elektrane [kW]	Vjerojatnost	Očekivana proizvedena energija uz uzimanje u obzir kvarova i smanjeno vrijeme trajanja kvarova [kWh]
1.	3,59	60,6%	19 011,69
2.	10,76	6,67%	6 275,70
3.	17,85	3,94%	6 150,27
4.	25,03	3,53%	7 724,25
5.	32,30	2,58%	7 290,34
6.	39,46	2,04%	7 054,19
7.	46,64	3,03%	12 342,26
8.	53,83	2,36%	11 128,37
9.	61,01	1,92%	10 235,56
10.	68,18	3,11%	18 520,93
11.	75,36	2,05%	13 547,22
12.	82,54	2,70%	19 454,20
13.	89,72	2,53%	19 890,92
14.	96,89	2,10%	17 804,66
15.	104,07	0,73%	7 331,73

U scenariju 3, ukupna prosječna energija je u odnosu na scenarij 1 smanjena na 183,8 MWh, što je smanjenje od 0,13%. Koeficijent iskorištenja instalirane snage će se također smanjiti te u ovom scenariju iznosi 20,97 %. Slikom 4 su prikazane usporedbe scenarija 1 i 3 i kao što se može uočiti, očekivana proizvedena energija je za svaki razred približno jednaka u oba scenarija.



Slika 4. Usporedba očekivane proizvodnje energije po razredima za scenarij 1 i scenarij 3

Očekivane prosječne energije u scenarijima 1 i 3 se ne razlikuju značajno, budući da se pretpostavilo kratko vrijeme zastoja. Što je vrijeme zastoja kraće, manje će biti i razlike u očekivanoj proizvedenoj energiji.

3.4. Scenarij 4 - Očekivana godišnja proizvodnja fotonaponske elektrane uz uzimanje u obzir kvarova i duže vrijeme zastoja

Zbog različitih uzrok, vrijeme otklanjanja kvara pojedine komponente može biti i značajno duže te se stoga u scenariju 4 pretpostavlja da će vrijeme trajanja zastoja pojedine komponente biti četiri puta duže nego u scenariju 2 što je prikazano u tablici 12. Učestalost kvarova je ista kao i u prethodna dva scenarija.

Tablica 12. Trajanje kvarova po komponentama fotonaponskog sustava

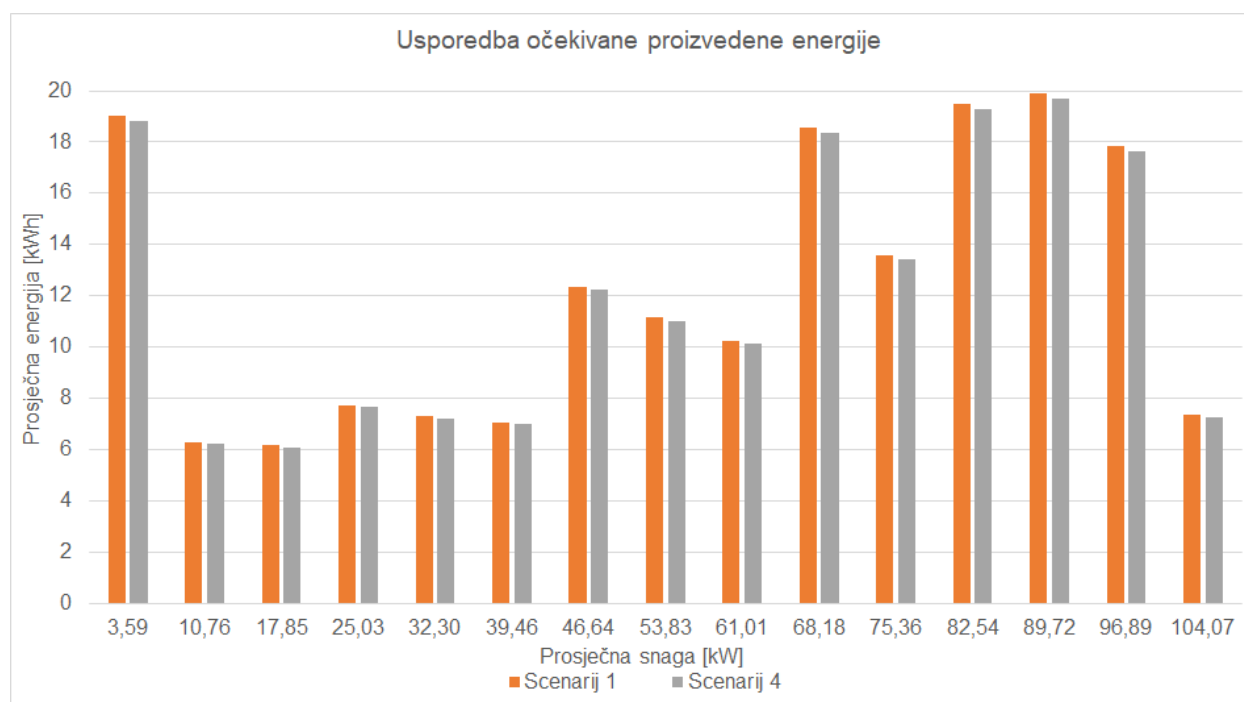
Komponenta	Prosječno vrijeme zastoja [sat/jedinici]
Fotonaponski modul	16
Inverter	3
Komunikacijska i mjerna oprema	24
Transformator	32
Kabeli i spojna oprema	16

U ovom scenariju ukupno vrijeme zastoja t_u je 91 sat. U ovom scenariju se pretpostavlja incidencija težih oštećenja opreme, npr. oštećenja nastala zbog snijega, jake kiše, leda, vjetra i sličnih utjecaja koji dovode do oštećenja opreme i produljenog vremena otklanjanja kvara. Pokazatelji za scenarij 3 su prikazani u tablici 13.

Tablica 13. Očekivana proizvedena električna energija za svaki razred u scenariju 3

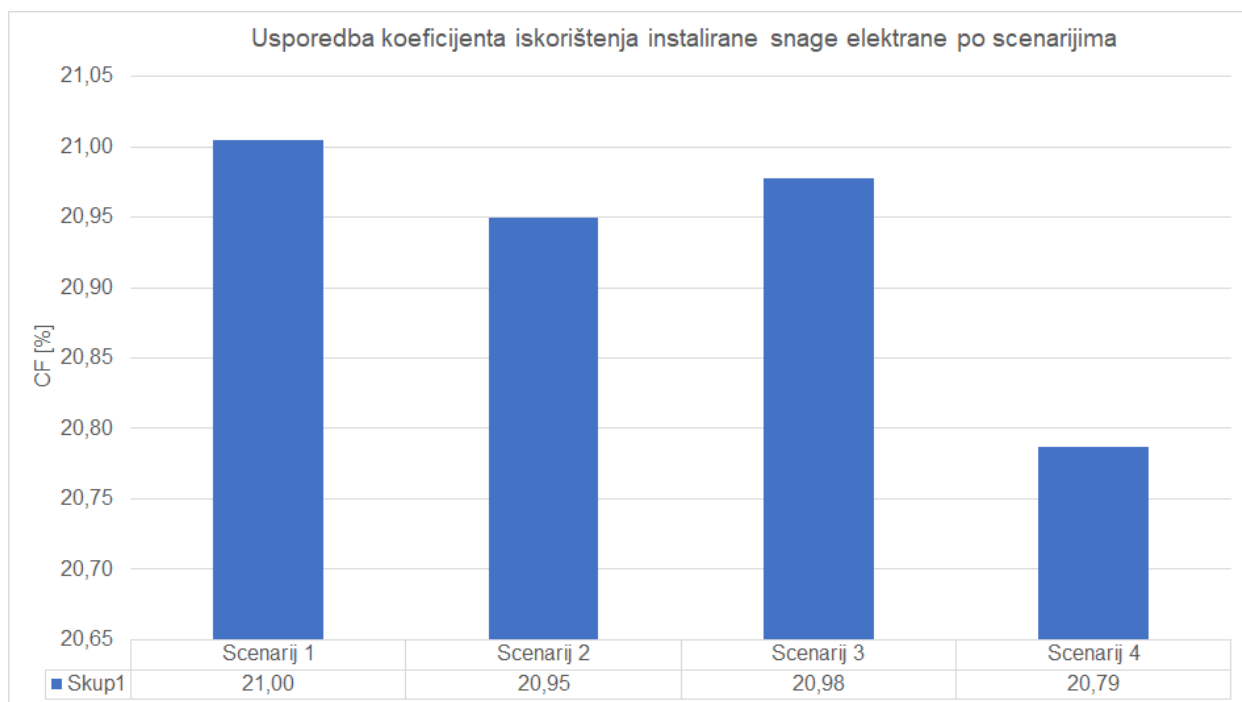
	Prosječna snaga elektrane [kW]	Vjerojatnost	Očekivana proizvedena energija uz uzimanje u obzir kvarova i produženo vrijeme trajanja kvarova [kWh]
1.	3,59	60,6%	18 838,60
2.	10,76	6,67%	6 218,56
3.	17,85	3,94%	6 094,28
4.	25,03	3,53%	7 653,93
5.	32,30	2,58%	7 223,97
6.	39,46	2,04%	6 989,97
7.	46,64	3,03%	12 229,90
8.	53,83	2,36%	11 027,06
9.	61,01	1,92%	10 142,37
10.	68,18	3,11%	18 352,31
11.	75,36	2,05%	13 423,89
12.	82,54	2,70%	19 277,09
13.	89,72	2,53%	19 709,83
14.	96,89	2,10%	17 642,56
15.	104,07	0,73%	7 264,98

U scenariju 4, godišnje očekivana proizvedena energija iz fotonaponske elektrane je 182,09 MWh. Smanjenje očekivane godišnje proizvedene energije u odnosu na scenarij 1 iznosi 1,04%, a koeficijent iskorištenja instalirane snage će se također smanjiti te u ovom scenariju iznosi 20,79%. Slikom 5 su prikazane usporedbe scenarija 1 i 4. Povećanje vremena zastoja dovodi do smanjenja očekivane proizvedene energije po razredima.



Slika 5. Usporedba očekivane proizvodnje energije po razredima za scenarij 1 i scenarij 4

Prema navedenim razmatranjima, koeficijent iskorištenja instalirane snage se ne mijenja značajno za vremena zastoja elektrane obuhvaćena u scenarijima 2, 3 i 4. Prema literaturi, vjerojatnost pojave kvara je jako niska i vrijeme otklanjanja kvara je kratko. Usporedba koeficijenata iskorištenja instalirane snage za pojedine scenarije je prikazana slikom 6 i jasno je da je u scenariju 1 koeficijent najveći s obzirom da nisu uzeti u obzir zastoji nego čista proizvodnja energije ovisna o zemljopisnom položaju i godišnjem dobu.



Slika 6. Usporedba koeficijenta iskorištenja instalirane snage (CF) za sve scenarije

Značajno povećanje vremena zastoja utječe na smanjenje koeficijenta iskorištenja instalirane snage, kako se vidi prema rezultatima scenarija 4. Također, na rezultate utječe korištena tehnologija, u ovom slučaju polikristalni silicij čija je učinkovitost 17%. Primjenom druge tehnologije bi se značajno povećala ukupna proizvodnja električne energije i time bi se u većoj mjeri iskoristila energija Sunčevog zračenja.

4. ZAKLJUČAK

Proizvodnja fotonaponskih elektrana ovisi o zemljopisnom položaju elektrane, dobu godine, dobu dana, upotrijebljenoj tehnologiji te vremenskim uvjetima što treba uzeti u obzir pri planiranju proizvodnje električne energije iz te vrste elektrana. Zbog toga elektrana neće raditi svojim punim kapacitetom i stvarna proizvodnja će biti značajno niža u odnosu na elektranu na biomasu ili vjetroelektranu iste instalirane snage. Pored navedenih utjecaja, na ukupnu proizvodnju utječe i vrijeme zastoja zbog pojave kvara na pojedinom elementu elektrane. U ovom radu analiziran je utjecaj zastoja pojedine komponente elektrane na ukupnu proizvedenu električnu energiju. Fotonaponske elektrane imaju nisku učestalost pojave kvara, a vrijeme otklanjanja kvara može trajati od nekoliko minuta za kvarove i smetnje u komunikacijskim uređajima do nekoliko dana ukoliko se radi o ozbiljnijim poremećajima kao što je mehaničko oštećenje fotonaponskih modula i/ili invertera. Iz tog razloga, u radu su istražena tri scenarija sa različitim vremenom ukljanjanja kvara. Rezultati izračuna očekivane godišnje proizvedene energije ukazuju na mali utjecaj kvarova fotonaponske elektrane čak i za scenarij u kojem je vrijeme trajanja popravka povećano. Navedena metodologija predstavlja prvi korak u istraživanju utjecaja pouzdanosti na performanse fotonaponskih elektrane i upućuje na daljnje istraživanje utjecaja kvarova. Za očekivati je da starenjem fotonaponskih elektrana će se povećati intenzitet kvarova pa će i njihov utjecaj biti značajniji. Zbog navedenog, nastavak istraživanja će u fokus staviti upravo metodu procjene i određivanja točnijeg vremena potrebnog za popravak fotonaponske elektrane u cijelosti, ali i pojedine komponente unutar elektrane. Nadalje, pokazatelji proizvodnje su računati na temelju podataka iz PV GIS-a za danu lokaciju pri čemu nisu uzeti u obzir podaci o naoblaci, kiši, zasjenjenju na točnoj lokaciji elektrane. Pokazatelji proizvodnje su grupirani u razrede na temelju statističke obrade podataka. Drugi smjer poboljšanja i unaprjeđenja primijenjene metode je u primjeni stvarnih meteoroloških podataka dobivenih stvarnim mjerenjima na odabranoj lokaciji i povećanje broja razreda u koje se ti podaci dijele.

5. LITERATURA

- [1] H. Abdulla, A. Sleptchenko, and A. Nayfeh, "Photovoltaic systems operation and maintenance: A review and future directions," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 195, p. 114342, May 2024, doi: 10.1016/j.rser.2024.114342.
- [2] S. O. Obatola, "Reliability Overview of Grid-Connected Solar PV System: A Review," *Arch. Adv. Eng. Sci.*, pp. 1–10, Jun. 2024, doi: 10.47852/bonviewAAES42023083.
- [3] O. Sadeghian, A. Oshnoei, S. Nikkhah, and B. Mohammadi-Ivatloo, "Multi-objective optimisation of generation maintenance scheduling in restructured power systems based on global criterion method," *IET Smart Grid*, vol. 2, no. 2, pp. 203–213, Jun. 2019, doi: 10.1049/iet-stg.2018.0140.
- [4] H. Lotfi, M. E. Hajiabadi, and H. Parsadust, "Power Distribution Network Reconfiguration Techniques: A Thorough Review," *Sustainability*, vol. 16, no. 23, p. 10307, Nov. 2024, doi: 10.3390/su162310307.
- [5] O. Kahouli, H. Alsaif, Y. Bouteraa, N. Ben Ali, and M. Chaabene, "Power System Reconfiguration in Distribution Network for Improving Reliability Using Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 7, p. 3092, Mar. 2021, doi: 10.3390/app11073092.
- [6] M. Muzammal Islam *et al.*, "Improving Reliability and Stability of the Power Systems: A Comprehensive Review on the Role of Energy Storage Systems to Enhance Flexibility," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 152738–152765, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3476959.
- [7] P. S. Meera and S. Hemamalini, "Reliability assessment and enhancement of distribution networks integrated with renewable distributed generators: A review," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 54, p. 102812, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102812.
- [8] R. H. AlNahal, A. F. Naiem, M. F. Shaaban, and M. Ismail, "Optimal Planning of Parking Lots of PEVs Incorporating V2G for Reliability Improvement of Distribution Systems," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 123521–123533, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3224753.
- [9] H. J. Jabir, J. Teh, D. Ishak, and H. Abunima, "Impact of Demand-Side Management on the Reliability of Generation Systems," *Energies*, vol. 11, no. 8, p. 2155, Aug. 2018, doi: 10.3390/en11082155.
- [10] C. Sheng, G. Gao, R. Sun, W. Liu, and T. Xia, "Distribution Grid Reliability Assessment Considering Multiple Scenarios of Distributed Power Supplies," in *2023 Power Electronics and Power System Conference (PEPSC)*, Nov. 2023, pp. 415–420, doi: 10.1109/PEPSC58749.2023.10395700.
- [11] G. Chenfang, W. Saiyi, H. Yueshen, W. Zhenhua, and W. Shizhao, "Research On Reliability Of Power Grid With Distributed Generation," in *2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, Sep. 2018, pp. 2350–2356, doi: 10.1109/CICED.2018.8592189.
- [12] A. Sayed, M. El-Shimy, M. El-Metwally, and M. Elshahed, "Reliability, Availability and Maintainability Analysis for Grid-Connected Solar Photovoltaic Systems," *Energies*, vol. 12, no. 7, p. 1213, Mar. 2019, doi: 10.3390/en12071213.
- [13] S. Baschel, E. Koubli, J. Roy, and R. Gottschalg, "Impact of Component Reliability on Large Scale Photovoltaic Systems' Performance," *Energies*, vol. 11, no. 6, p. 1579, Jun. 2018, doi: 10.3390/en11061579.
- [14] S.-V. Oprea, A. Bara, D. Preotescu, and L. Elefterescu, "Photovoltaic Power Plants (PV-PP) Reliability Indicators for Improving Operation and Maintenance Activities. A Case Study of PV-PP Agigea Located in Romania," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 39142–39157, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2907098.
- [15] I. Lillo-Bravo, P. González-Martínez, M. Larrañeta, and J. Guasumba-Codena, "Impact of Energy Losses Due to Failures on Photovoltaic Plant Energy Balance," *Energies*, vol. 11, no. 2, p. 363, Feb. 2018, doi: 10.3390/en11020363.
- [16] S. Singh Kshatri, J. Dhillon, and S. Mishra, "Impact of Panel Degradation Rate and Oversizing On PV Inverter Reliability," in *2021 4th International Conference on Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE)*, Oct. 2021, pp. 137–141, doi: 10.1109/RDCAPE52977.2021.9633585.
- [17] A. Sangwongwanich, Y. Yang, D. Sera, and F. Blaabjerg, "Lifetime Evaluation of Grid-Connected PV Inverters Considering Panel Degradation Rates and Installation Sites," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 2, pp. 1225–1236, Feb. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2678169.
- [18] "Photovoltaic Geographical Information System, PVGIS," 2025. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/, pristupljeno 10. siječnja 2025. godine
- [19] H. A. Sturges, "The Choice of a Class Interval," *J. Am. Stat. Assoc.*, vol. 21, no. 153, pp. 65–66, Mar. 1926, doi: 10.1080/01621459.1926.10502161.
- [20] Solvis, "Solvis fotonaponski moduli," 2025. <https://solvis.hr/proizvodi/polikristalni-moduli/>,

pristupljeno 15. siječnja 2025. godine

- [21] A. Colli, "Failure mode and effect analysis for photovoltaic systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 50, pp. 804–809, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.05.056.
- [22] S. Gallardo-Saavedra, L. Hernández-Callejo, and O. Duque-Pérez, "Quantitative failure rates and modes analysis in photovoltaic plants," *Energy*, vol. 183, pp. 825–836, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.06.185.
- [23] J.-W. Shin, K.-H. Yoon, H.-S. Chai, and J.-C. Kim, "Reliability-Centered Maintenance Scheduling of Photovoltaic Components According to Failure Effects," *Energies*, vol. 15, no. 7, p. 2529, Mar. 2022, doi: 10.3390/en15072529.