doi: 10.46793/EEE26-3.07M

Originalni naučni rad

UDK 621.311.243/.6:338.5(497.11)

Procena ostvarene tržišne cene i uticaja integracije baterijskog skladišta energije na ovu cenu kod solarnih fotonaponskih elektrana u Srbiji

Željko Marković[*], Dejan Stojčevski[**], Miloš Kostić[***]

[*] SCITECH d.o.o. Beograd

[**] SEEPEX a.d. Beograd

[***] MT KOMEX d.o.o. Beograd

Rezime - Povećanje udela solarnih fotonaponskih elektrana (SFNE) i rast volatilnosti veleprodajnih cena električne energije zahtevaju analize prihoda koje prevazilaze jednostavnu upotrebu prosečne godišnje tržišne cene. Ostvarena ponderisana tržišna cena proizvodnje (CP) predstavlja ključni pokazatelj stvarne tržišne vrednosti proizvodnje. U radu je izvršena procena CP solarnih fotonaponskih elektrana u Srbiji za period 2023–2025. godine. S obzirom na nedostatak javno dostupnih agregiranih satnih podataka o proizvodnji svih SFNE u Srbiji, razvijen je metodološki pristup zasnovan na ERA5 meteorološkoj reanalizi koju objavljuje Copernicus Climate Change Service, kojim je modelovana uniformno raspoređena flota SFNE na celokupnoj teritoriji Srbije. Za proračun su korišćene ostvarene satne cene sa tržišta „dan unapred“ na nacionalnoj berzi SEEPEX. Metodologija je potvrđena poređenjem sa izmerenim satnim podacima o proizvodnji referentne elektrane za 2024. i 2025. godinu, pri čemu su odstupanja izračunatih vrednosti CP bila manja od 2%, što potvrđuje robusnost predloženog pristupa. Dalje je analiziran uticaj integracije baterijskog skladišta energije (BESS) u dve konfiguracije (nominalne snage 25% i 50% od instalisane snage PV elektrane, i kapaciteta 2 sata), simulacijom algoritma optimalnog upravljanja uz potpunu informaciju o budućim cenama. Rezultati pokazuju da integracija BESS sistema povećava CP, ali istovremeno povećava odstupanja dobijenih vrednosti CP između modela uniformno raspoređene SFNE flote i rezultata na nivou pojedinačne, referentne elektrane (5–8%). Predstavljeni okvir omogućava transparentnu i ponovljivu metodologiju za procenu tržišne vrednosti SFNE i hibridne SFNE (sa BESS) u narednim godinama na tržištu Srbije.

Ključne reči – solarne fotonaponske elektrane, ERA5, ostvarena ponderisana tržišna cena proizvodnje, SEEPEX, baterijsko skladište energije (BESS)

I UVOD

Razvoj solarnih fotonaponskih elektrana (SFNE) u Republici Srbiji se poslednjih godina odvija paralelno sa sve izraženijom volatilnošću cena na dan unapred tržištu električne energije. Stoga je ostvarena ponderisana tržišna cena proizvodnje (CP) (eng. *capture price*), danas centralni parametar u modelima prihoda za projekte obnovljivih izvora energije. Za razliku od prosečne godišnje cene koja je ostvarena na tržištu dan unapred, CP odražava realno ostvareni prihod po MWh proizvedene električne energije i direktno utiče na procenu godišnjeg prihoda, proračun neto sadašnje vrednosti (NPV) i interne stope prinosa (IRR), analizu pokrića duga (DSCR) kao i procenu dugoročne kanibalizacije cene[1] u scenarijima rasta proizvodnje iz obnovljivih izvora energije (OIE).

Radi poređenja CP sa ostvarenom prosečnom cenom na berzi, koristi se i pokazatelj koji se naziva stopa ostvarenja tržišne cene (CR) (eng. *capture rate*), i koji je definisan kao odnos CP i prosečne tržišne cene u istom periodu. CR manji od 100% ukazuje na efekat tržišne kanibalizacije, odnosno na činjenicu da proizvodnja dominantno nastaje u satima sa nižim cenama [1].

Imajući u vidu prethodno, jedan od ciljeva ovog rada je da se ustanovi metodologija i izvrši kvalitetna procena CP solarnih fotonaponskih elektrana u Srbiji za prethodne tri godine (2023 – 2025), u situaciji kada su poznate ostvarene satne cene sa dan unapred tržišta SEEPEX i kada potpuni satni podaci o ukupnoj proizvodnji svih SFNE nisu javno dostupni, što je slučaj za Srbiju. Dalje, radi provere pouzdanosti primenjene metodologije, dobijene vrednosti CP biće upoređene sa konkretno izračunatom ostvarenom CP za referentnu SFNE, koja će biti proračunata na osnovu izmerenih satnih podataka o proizvodnji u prethodne dve godine (na brojilu elektrane). Ovakav postupak omogućava kvantifikovanje odstupanja između predloženog modela i realnog postrojenja, te predstavlja osnov za ocenu validnosti predloženog pristupa u kontekstu tržišne analize.

U radu će se dalje analizirati uticaj integracije baterijskog skladišta energije (BESS) (eng. *battery energy storage system*) na ostvarenu CP solarnih fotonaponskih elektrana. U tom smislu, izvršiće se simulacija različitih konfiguracija hibridnog sistema, primenom algoritma optimalnog upravljanja uz pretpostavku potpune informacije o budućim cenama, sa ciljem određivanja uticaja dodatog BESS u hibridnom sistemu na CP i potencijalnog povećanja tržišne vrednosti proizvodnje, kako na nivou modela koji je korišćen za procenu vrednosti CP, tako i za referentnu elektranu koja se koristi za verifikaciju rezultata.

Na kraju, u zaključku rada će se razmotriti implikacije nalaza na

[1] Kanibalizacija cene označava pad ostvarene tržišne vrednosti proizvodnje iz varijabilnih obnovljivih izvora usled njihove vremenske koncentracije i povećane penetracije u sistemu, što dovodi do nižih cena u satima visoke proizvodnje.

buduće tržišno pozicioniranje solarnih i hibridnih sistema u Srbiji, posebno u pogledu daljeg rasta instaliranih kapaciteta i promena strukture tržišta električne energije.

II METODOLOŠKI PRISTUP ODREĐIVANJU CP NA NIVOU SRBIJE

Vodeće međunarodne agencije (kao što su IEA, IRENA i dr.) redovno objavljuju vrednosti CP i CR po pojedinim tehnologijama na nivou pojedinih država ili tržišnih zona. U skladu sa navedenom praksom, CP predstavlja prosečnu cenu električne energije ostvarenu na tržištu, ponderisanu stvarnom satnom proizvodnjom posmatranog postrojenja (ili grupe postrojenja), pa se stoga definiše kao:

$$CP = \frac{\sum_{t=1}^{N} \lambda_t \cdot E_t}{\sum_{t=1}^{N} E_t} \quad (1)$$

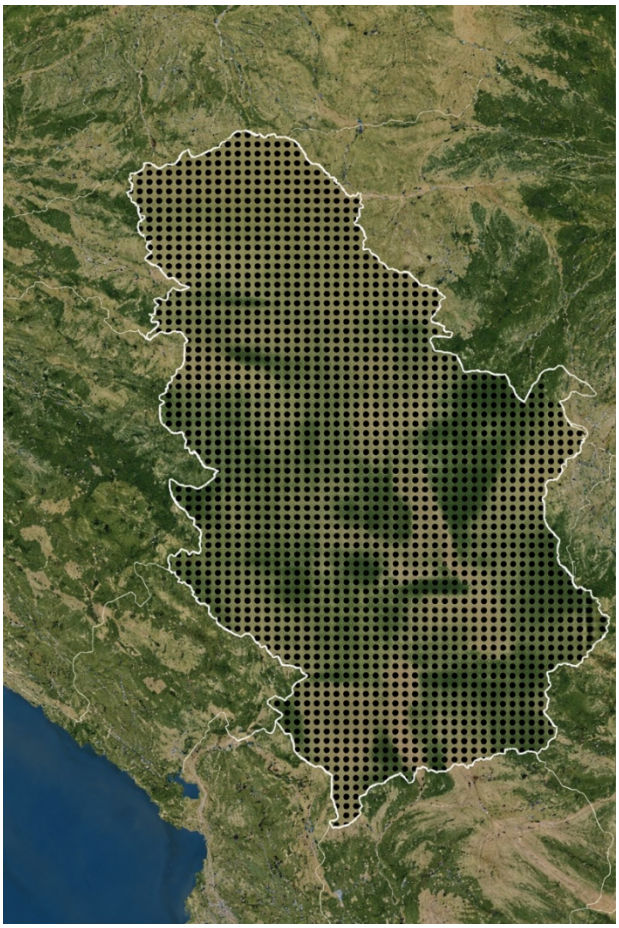
gde je λ_t satna cena električne energije na dnevnom tržištu, a E_t satna proizvodnja elektrane.

Metodološki najadekvatniji pristup za proračun CP podrazumeva korišćenje stvarnih satnih podataka o agregiranoj proizvodnji po tehnologijama, koji su za većinu EU zemalja dostupni putem ENTSO-E Transparency Platform[2], uz kombinovanje sa odgovarajućim satnim cenama sa relevantnog tržišta. Na taj način dobija se reprezentativna vrednost tržišne cene za celokupnu tehnologiju na nivou države, čime se eliminišu efekti vezani za lokaciju pojedinačne elektrane i omogućava uporedivost rezultata između zemalja. Naime, pojedinačno postrojenje reflektuje specifične karakteristike koje su vezane za lokaciju elektrane (mikro-klima, nagib i orijentacija modula, lokalna oblačnost, potencijalna ograničenja nametnuta od strane operatora mreže), što može dovesti do odstupanja u odnosu na prosečno tržišno ponašanje cele tehnologije. Ovakav pristup je naročito značajan u analizama efekta kanibalizacije, jer efekat pada CR zavisi prvenstveno od ukupnog udela tehnologije u sistemu, a ne od performansi pojedinačne elektrane. Zbog toga se u međunarodnoj praksi CP i CR po tehnologijama gotovo uvek definišu na nivou tržišne zone ili države, što omogućava uporedivost rezultata između zemalja i kroz vreme.

Uzimajući u obzir da agregirani satni podaci o proizvodnji svih SFNE u Srbiji nisu javno dostupni, u ovom radu je predložen i primenjen aproksimativni pristup koji metodološki prati princip nacionalne agregacije. U nedostatku stvarnih agregiranih podataka ideja je da se modeluje uniformno raspoređena flota SFNE na celokupnoj teritoriji Republike Srbije, i da se na osnovu poznatih meteoroloških podataka, zasnovanih na ERA5 meteorološkoj reanalizi Copernicus Climate Change Service[3], odrede satne proizvodnje (energetski prinosi) kroz pojednostavljeni, ali fizički konzistentan model satne proizvodnje zasnovan na globalnoj iradijaciji i temperaturnoj korekciji snage za tako modelovanu flotu solarnih elektrana.

Da bi modelovali uniformno raspoređenu SFNE flotu, najpre su iz baze ERA5 za sve sate u prethodne tri godine, preuzete sve dostupne tačke za teritoriju Srbije ERA5 rezolucije (~0.25° × 0.25°). Na taj način je preuzeto tačno 357 tačaka ravnomerno raspoređenih na teritoriji Srbije, kao što je prikazano na Slici 1. Za svaku tačku su preuzete sledeće vrednosti:

- globalno horizontalno zračenje pri tlu (eng. *Surface Solar Radiation Downwards*) - SSRD, [J/m²],
- temperatura vazduha na 2 m visine, T_{2m}, [K].



Slika 1. Grafička reprezentacija tačaka koje učestvuju u formiranju modela SFNE flote Srbije

Nakon toga je, korišćenjem softverskog alata CDO[4] (Climate Data Operators), izvršena prostorna agregacija po satu:

$$\bar{SSRD}(t) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} SSR\ D_i(t), \bar{T}_{2m}(t) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} T_{2m,i}\ (t) \quad (2)$$

čime je, posle konverzije podataka o zračenju i temperaturi u odgovarajuće jedinice (W/m² i °C) dobijen reprezentativni satni meteorološki profil na nivou države.

Sledeći korak je modeliranje i proračun satnih proizvodnji ovako modelirane uniformne SFNE flote Srbije. Za određivanje trenutne proizvodnje SFNE se u praksi mogu koristiti različiti modeli koji se, u skladu sa svojim nivoom složenosti, mogu svrstati u tri osnovne grupe:

- fizički detaljni modeli, najvećeg stepena složenosti, koji su zasnovani na jedno-diodnoj (*single-diode*) formulaciji strujno-naponske (*I–V*) karakteristike modula,
- polu-empirijski modeli, srednjeg nivoa složenosti, koji kombinuju transpoziciju sunčeve iradijacije i temperaturne korekcije efikasnosti, i

[2] https://transparency.entsoe.eu/
[3] https://climate.copernicus.eu/
[4] https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo

- pojednostavljeni modeli, koji su zasnovani na globalnom zračenju i linearnim korekcijama.

Izbor modela prvenstveno zavisi i od cilja analize, odnosno, da li se analiziraju tehničke procene energetskog prinosa ili tržišne procene vrednosti proizvodnje. S obzirom da je primarni cilj ovog rada procena tržišnih parametara, a ne precizna tehnička procena energetskog prinosa elektrane, u ovom istraživanju primenjen je pojednostavljeni, ali fizički konzistentan model satne proizvodnje zasnovan na globalnoj iradijaciji i temperaturnoj korekciji snage. Time se zadržava ključni element za analizu tržišne vrednosti – vremenska raspodela proizvodnje, ali se smanjuju ulazne pretpostavke.

Satna proizvodnja po jedinici instalisane snage (1 kWp) modelovana je kao:

$$g(t) = \frac{1}{1000} \cdot \frac{SSRD(t)}{3600} \cdot (1 - L_{sys}) \cdot [1+\gamma_P(T_{cell}(t) - 25)] \quad (3)$$

gde su:

- $g(t)$ proizvodnja po 1 kWp u satu t,
- globalno horizontalno zračenje pri tlu izraženo u W/m^2 $(SSRD(t)/3600)$ koje je deljenjem sa 1000 normalizovano na STC uslove,
- L_{sys} zbirni sistemski gubici,
- γ_P temperaturni koeficijent snage,
- $T_{cell}(t)$ temperatura ćelije PV panela.

U ovom radu usvojeno je: $T_{cell}(t) \approx T_{2m}(t)$ što predstavlja konzervativnu aproksimaciju, jer detaljniji modeli [2] uvode dodatnu zavisnost od vetra i iradijanse.

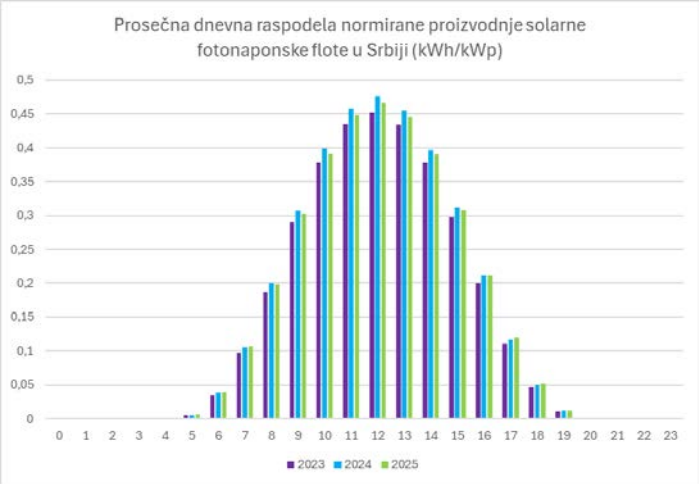
Dalje, zbirni sistemski gubici fotonaponskog sistema u ovom radu pretpostavljeni su na nivou $L_{sys} = 0.15$, što predstavlja tipičnu vrednost korišćenu u analizama proizvodnje fotonaponskih elektrana i obuhvata gubitke u invertorima, DC i AC kablovima, gubitke usled neusklađenosti modula[5], zaprljanje modula i druge operativne gubitke sistema. Ovakva agregirana pretpostavka često se koristi u modelima proizvodnje zasnovanim na meteorološkim podacima, naročito kada se modeluje reprezentativna flota postrojenja na nivou države [3].

Temperaturni koeficijent snage modula uzet je kao $\gamma_P = -0{,}0045/\circ\mathrm{C}$ što odgovara tipičnoj vrednosti za kristalne silicijumske foto-naponske module i predstavlja pad izlazne snage od približno 0,45% po °C povećanja temperature ćelije u odnosu na referentnu temperaturu od 25 °C [2].

Usvajanje jedinstvenih vrednosti zbirnih sistemskih gubitaka i temperaturnog koeficijenta predstavlja uobičajenu aproksimaciju u makroskopskim analizama proizvodnje, gde je cilj reprodukcija reprezentativnog proizvodnog profila tehnologije na nivou tržišne zone, a ne detaljno modelovanje performansi pojedinačne elektrane.

III Rezultati procene CP u Srbiji

Na osnovu prethodno definisanog modela određena je satna normirana proizvodnja $g(t)$ za svaku godinu posmatranog perioda. Radi ilustracije i preglednijeg prikaza dobijenog karakterističnog proizvodnog profila uniformne SFNE flote Srbije, satne vrednosti normirane proizvodnje $g(t)$ agregirane su na nivo prosečnog dana. Prosečna vrednost proizvodnje određena je za svaki sat u toku dana na osnovu svih satnih vrednosti u posmatranoj godini, čime je dobijen reprezentativni dnevni profil proizvodnje SFNE flote, koji je prikazan na slici 2.



Slika 2. Prosečna dnevna raspodela normirane proizvodnje uniformne SFNE flote Srbije

Dalje, u tabeli 1 prikazane su dobijene agregirane godišnje vrednosti specifičnog prinosa uniformne SFNE flote Srbije.

Tabela 1. Agregirane godišnje vrednosti specifičnog prinosa uniformne SFNE flote Srbije

Godina	Specifična proizvodnja (kWh/kWp)	Ekvivalentni puni sati rada (h)
2023.	1.228,20	1.228
2024.	1.296,05	1.296
2025.	1.278,95	1.279

Potrebno je naglasiti da specifična proizvodnja dobijena za model uniformno raspoređene flote ne predstavlja prinos karakterističan za optimalne pojedinačne lokacije, već prostorno reprezentativnu vrednost za teritoriju cele Srbije. Pojedinačne SFNE koje su locirane na konkretnom lokalitetu sa povoljnijim solarnim resursom, uglavnom ostvaruju značajno viši specifični prinos od nacionalnog proseka modelovanog u ovom radu.

Prikazani dnevni profil proizvodnje i godišnji specifični prinosi potvrđuju da model uniformno raspoređene flote daje reprezentativan opis vremenske raspodele i intenziteta proizvodnje solarne tehnologije na nivou Srbije. Sledeći korak u analizi jeste određivanje njene tržišne vrednosti, odnosno izračunavanje CP za svaku posmatranu godinu. U tom cilju, satni profil proizvodnje uparen je sa odgovarajućim ostvarenim satnim cenama na tržištu „dan unapred“ na SEEPEX [4], na način kako

[5] Gubici usled neusklađenosti modula (eng. *mismatch losses*) nastaju zbog razlika u električnim karakteristikama pojedinačnih fotonaponskih modula ili nizova modula, koje mogu biti posledica proizvodnih tolerancija, neujednačenog zagrevanja, zaprljanja ili delimičnog zasenjivanja. U serijski povezanim nizovima, ukupna izlazna snaga ograničena je modulom sa najnižom strujom, što dovodi do smanjenja ukupne proizvodnje sistema.

je to opisano jednačinom (1), čime su dobijene godišnje vrednosti CP za period 2023–2025, a koje su prikazane u tabeli 2.

Tabela 2. Proračunate godišnje vrednosti CP za Srbiju, ostvarena prosečna cena na tržištu „dan unapred“ na SEEPEX i ostvareni CR

Godina	*Capture Price* (EUR/MWh)	Prosečna godišnja cena (EUR/MWh)	*Capture Rate* (%)
2023.	88,51	103,46	85,55
2024.	77,74	101,76	76,40
2025.	67,19	107,87	62,29

U cilju validacije primenjenog metodološkog pristupa, izvršena je i procena ostvarene tržišne cene za jednu referentnu solarnu fotonaponsku elektranu u Srbiji, korišćenjem stvarno izmerenih satnih podataka o proizvodnji. Kao referentna elektrana uzeta je SFNE DeLasol u vlasništvu preduzeća MT Komex d.o.o, koja se nalazi na području opštine Lapovo i ima instalisanu snagu od 11.760 kWp [5]. Elektrana je puštena u rad 2023. godine, pa su stoga korišćeni podaci za 2024. i 2025. godinu. Projektovana godišnja proizvodnja iznosi približno 15,7 GWh, pri čemu se proizvedena električna energija plasira u elektrodistributivni sistem.

Na osnovu satnog proizvodnog profila ove elektrane i odgovarajućih satnih cena električne energije na tržištu „dan unapred“, primenom istog izraza (1), izračunata je ostvarena ponderisana tržišna cena za posmatrane godine, što je prikazano tabelom 3.

Tabela 3. Proračunate godišnje vrednosti CP za SFNE DeLasol, ostvaren specifični prinos i ostvareni CR

Godina	CP (EUR/MWh)	Specifična proizvodnja (kWh/kWp)	CR (%)
2024.	76,22	1.633,84	74,90
2025.	66,09	1.600,13	61,27

Dobijeni rezultati zatim su upoređeni sa vrednostima CP dobijenim na osnovu modela uniformno raspoređene flote na teritoriji Srbije. Poređenje pokazuje da odstupanja između modelovanih i stvarnih vrednosti iznose do 2% (relativna greška je 1,99% za 2024. godinu i 1,66% za 2025. godinu), što potvrđuje da model uniformno raspoređene flote predstavlja adekvatnu aproksimaciju proizvodnog profila solarnih fotonaponskih elektrana na nivou Srbije i može se koristiti za analizu njihove tržišne vrednosti.

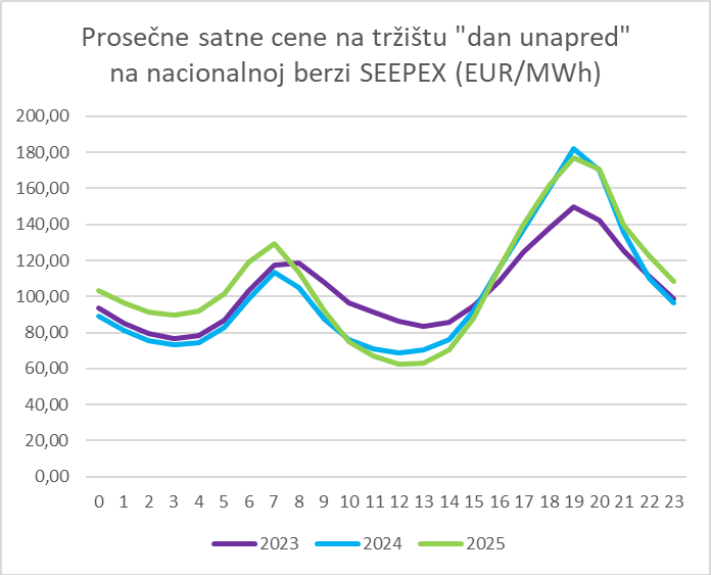
Vidi se da CP za uniformnu flotu Srbije u posmatranom periodu opada redom za 12,17% (2024. u odnosu na 2023.) i 13,57% (2025. u odnosu na 2024.), a slično se dobija i u slučaju SFNE DeLasol, 15,33% (2025. u odnosu na 2024.), odnosno da postoji prisutan efekat kanibalizacije uprkos relativno stabilnim ili čak rastućim godišnjim prosečnim cenama na tržištu električne energije u Srbiji.

U posmatranom periodu (2023 – 2025. godina) je zabeležen rast instalisanih kapaciteta SFNE u Srbiji. Ukupna instalisana snaga solarnih elektrana porasla je sa približno 100 MW u 2023. godini na oko 318 MW u 2025. godini, uz značajno povećanje novih instalacija tokom 2024. i 2025. godine [6]. Uprkos tom rastu, ukupni kapacitet SFNE u Srbiji i dalje je relativno skroman i njegov apsolutni nivo ostaje relativno nizak u poređenju sa kapacitetima u susednim tržišnim zonama. Naime, u državama regiona instalirani kapaciteti SFNE dostižu višestruko veće vrednosti, na primer oko 5,8 GW u Mađarskoj, oko 2,9 GW u Rumuniji i oko 3,1 GW u Bugarskoj [7].

Prethodno ukazuje da uočeni efekti pada cena u dnevnim satima na SEEPEX tržištu su u manjoj meri posledica rasta proizvodnje iz domaćih solarnih elektrana, i da su u značajnoj meri povezani sa kretanjima na integrisanom evropskom tržištu električne energije.

Naime, u uslovima integrisanih evropskih tržišta i prekogranične trgovine električnom energijom, niske ili negativne cene koje se javljaju na tržištima sa visokim udelom solarne proizvodnje mogu se putem prekograničnih tokova preneti i na susedne tržišne zone. U takvim situacijama dolazi do povećanog uvoza električne energije u satima visoke solarne proizvodnje u regionu, što se reflektuje i na formiranje cena na SEEPEX tržištu „dan unapred“, čak i u situaciji kada domaći solarni kapaciteti još uvek nisu dostigli nivo koji bi samostalno mogao proizvesti izražen efekat kanibalizacije cena.

Stoga je u cilju dodatne analize vremenske strukture cena električne energije na tržištu „dan unapred“, izvršena i analiza prosečnih satnih cena za svaku od posmatranih godina. Na slici 3 prikazana je raspodela prosečnih satnih cena na SEEPEX tržištu za period 2023–2025.



Slika 3. Prosečne satne cene na tržištu „dan unapred“ na nacionalnoj berzi SEEPEX

Sa slike 3 se može uočiti da se u svim posmatranim godinama javlja karakterističan dnevni obrazac formiranja cena električne energije, sa minimumom u periodu od 12 do 13 časova i maksimumom u periodu od 19 do 20 časova (često se takav dnevni obrazac u literaturi opisuje pojmom *„duck curve“*). Istovremeno, uočava se trend povećanja dnevnog raspona cena (eng. *price spread*), odnosno razlike između minimalnih i maksimalnih dnevnih cena, pri čemu je taj odnos najizraženiji u 2025. godini. Ovo povećanje razlike između dnevnog minimuma i večernjeg maksimuma dnevnog raspona cena ukazuje na pad

CP, ali sa druge strane predstavlja ključni signal za potencijalnu primenu energetskih skladišta. U takvim uslovima BESS mogu omogućiti vremensko pomeranje proizvodnje iz perioda nižih cena u periode viših cena, čime se povećava ostvarena tržišna vrednost proizvodnje solarnih elektrana.

U tom kontekstu, u nastavku rada analiziran je potencijal povećanja ostvarene tržišne cene SFNE primenom BESS u hibridnoj konfiguraciji kroz simulaciju arbitražne strategije na tržištu „dan unapred". Razvoj ovakvih hibridnih konfiguracija dodatno je podstaknut značajnim padom investicionih troškova BESS u poslednjim godinama što je značajno unapredilo ekonomsku opravdanost njihove primene, i omogućilo njihovu primenu u svrhu tržišne arbitraže i povećanja tržišne vrednosti proizvodnje.

IV Analiza uticaja BESS na ostvarenu CP SFNE

Baterijska skladišta energije omogućavaju vremensko pomeranje proizvodnje električne energije iz perioda nižih tržišnih cena u periode viših cena. U slučaju solarnih elektrana, ovo se najčešće odnosi na pomeranje proizvodnje iz dnevnih sati, kada je proizvodnja SFNE najveća, a cene na tržištu najmanje (često i negativne), u večernje sate, kada proizvodnja iz SFNE opada ili je i nema, dok su cene električne energije uglavnom na maksimalnim vrednostima. Na taj način hibridne elektrane (SFNE+BESS) mogu ostvariti višu ponderisanu tržišnu cenu u odnosu na samostalne solarne elektrane.

U cilju analize uticaja BESS na CP u hibridnoj konfiguraciji SFNE+BESS, u radu su razmatrane dve konfiguracije BESS sistema:

- BESS čija je snaga 25% instalisane snage SFNE sa trajanjem skladištenja 2 sata, i
- BESS čija je snaga 50% instalisane snage SFNE sa trajanjem skladištenja 2 sata.

Ove dve konfiguracije izabrane su kao reprezentativne za hibridne elektrane koji se razmatraju u svrhu tržišne arbitraže. Analize međunarodnih institucija pokazuju da se u savremenim projektima velikih solarnih elektrana najčešće primenjuju baterijski sistemi čija snaga iznosi približno 20–60% instalisane snage solarne elektrane, uz trajanje skladištenja od 2 do 4 sata [8, 9]. Budući da se prosečna razlika u ceni smanjuje sa povećanjem trajanja skladištenja (slika 3), za razmatrane konfiguracije je izabrano trajanje skladištenja od 2 sata.

Rad BESS modelovan je kao problem maksimizacije prihoda od prodaje električne energije na tržištu „dan unapred", uz pretpostavku da se BESS može puniti samo sa energijom proizvedenom u SFNE, bez preuzimanja energije iz mreže. Zadatak algoritma upravljanja BESS jeste određivanje optimalnog rasporeda njegovog punjenja i pražnjenja u toku vremena (u toku jednog dana), uz uvažavanje tehničkih ograničenja sistema. Radi ilustracije, za primer dnevnog dijagrama sa slike 3, BESS bi se punio u 12 i 13 satu, a praznio u 19 i 20 satu.

Matematički, cilj algoritma može se predstaviti kao maksimizacija ukupnog prihoda u posmatranom periodu:

$$\max \sum_{t=1}^{T} \lambda(t) \cdot E_{grid}(t) \tag{4}$$

gde su:

- $\lambda(t)$– cena električne energije u satu t na tržištu „dan unapred",
- $E_{grid}(t)$– količina energije koju hibridna elektrana isporuči u mrežu u satu t,
- T – broj vremenskih intervala u posmatranom periodu.

Količina energije isporučena u mrežu predstavlja zbir direktne proizvodnje SFNE i energije isporučene iz BESS:

$$E_{grid}(t) = E_{PV}(t) - E_{charge}(t) + E_{discharge}(t) \tag{5}$$

gde su:

- $E_{PV}(t)$– proizvodnja SFNE,
- $E_{charge}(t)$– energija koja se skladišti u BESS,
- $E_{discharge}(t)$ – energija koja je isporučena iz BESS u mrežu.

Rad BESS dodatno je ograničen tehničkim karakteristikama sistema. Naime, stanje napunjenosti BESS se mora nalaziti u dozvoljenom opsegu:

$$SoC_{\min} \leq SoC(t) \leq SoC_{\max} \tag{6}$$

gde su $SoC_{\min}$ i $SoC_{\max}$ minimalno i maksimalno dozvoljeno stanje napunjenosti baterije, koji su usvojeni na 10%, odnosno na 90%, respektivno. U praksi se često preporučuje ograničavanje radnog opsega stanja napunjenosti baterije na približno 20–80% odnosno dubina pražnjenja (DoD) (eng. d*epth of discharge*) od 60%, kako bi se usporila degradacija litijum-jonskih ćelija i produžio životni vek BESS sistema [10]. U okviru ove analize usvojen je nešto širi opseg rada od 10–90% (DoD=80%), što predstavlja kompromis između realističnog operativnog režima baterije i potrebe da se u analizi obuhvati veći deo raspoloživog energetskog kapaciteta sistema. Na osnovu rezultata eksperimentalnih studija [11] prethodno ima za posledicu smanjenje životnog veka BESS za približno 25 – 35%, što svakako treba uzeti u obzir prilikom vršenja finansijskih analiza.

Maksimalna energija kojom se BESS može puniti ili prazniti u jednom vremenskom intervalu ograničena je nazivnom snagom BESS:

$$0 \leq E_{charge}(t) \leq P_{BESS}\Delta t,\ 0 \leq E_{discharge}(t) \leq P_{BESS}\Delta t \tag{7}$$

Promena stanja napunjenosti BESS između dva uzastopna vremenska koraka određena je energijom punjenja i pražnjenja uz uvažavanje efikasnosti procesa (eng. *round-trip efficiency*):

$$SoC(t+1) = SoC(t) + \eta_{ch}E_{charge}(t) - \frac{E_{discharge}(t)}{\eta_{dis}} \tag{8}$$

Ukupna efikasnost ciklusa punjenja η_{ch} i pražnjenja η_{dis} je za potrebe ovog rada modelovana sa jedinstvenom vrednošću od 0,9 što je uobičajena vrednost koja se koristi u literaturi [8].

U cilju simulacije rada hibridnog sistema razvijen je satni algoritam upravljanja baterijskim skladištem energije koji je potrebe ovog rada implementiran kao programski modul u Excel VBA okruženju. Algoritam za svaki sat određuje režim rada BESS na osnovu tržišne cene električne energije, raspoložive proizvodnje SFNE i trenutnog stanja napunjenosti baterije (*SoC (t)*).

U svakom vremenskom koraku BESS može biti u jednom od tri

režima rada: punjenje, pražnjenje ili mirovanje. Odluka o režimu rada donosi se uz uvažavanje tehničkih ograničenja baterijskog sistema, uključujući maksimalnu snagu punjenja i pražnjenja, raspoloživi energetski kapacitet baterije BESS i dozvoljeni opseg stanja napunjenosti BESS.

Simulacija rada BESS je u ovom radu zasnovana na pretpostavci potpune informacije o budućim cenama električne energije (tzv. *perfect foresight* pristup). Naravno, u praksi to nije uvek slučaj, jer se odluke o punjenju i pražnjenju donose na osnovu prognoze cena koja se radi u danu *D-1* za dan *D*. Ipak, ovakav idealizovan pristup je izabran jer omogućava procenu maksimalnog teorijskog potencijala povećanja tržišne vrednosti proizvodnje hibridne elektrane uz primenu BESS, dok bi u realnim uslovima ostvareni rezultati mogli biti nešto niži zbog neizvesnosti u prognozi cena. Pored toga, simulacija rada BESS je zasnovana i na pretpostavci da se ciklus punjenja i pražnjenja odvija jednom u toku dana.

Na osnovu prethodno opisanog modela izvršena je simulacija rada hibridnih elektrana za slučaj uniformne SFNE flote Srbije (SFNE+BESS flota Srbije), kao i za korišćenu referentnu SFNE DeLasol (SFNE+BESS DeLasol), za posmatrane godine. Za svaku od razmatranih konfiguracija sistema izračunata je CP na osnovu korigovanog satnog profila isporuke električne energije u mrežu. Rezultati simulacije, uključujući poređenje između SFNE bez baterijskog skladišta i hibridnih konfiguracija sa BESS sistemom, prikazani su sledećim tabelama.

Tabela 4. Godišnje vrednosti CP za različite konfiguracije sistema za slučaj uniformne SFNE flote Srbije

Konfiguracija sistema	2023 CP (€/MWh)	2024 CP (€/MWh)	2025 CP (€/MWh)
SFNE (bez BESS)	88,51	77,74	67,19
SFNE+BESS (25%, 2 sata)	97,11	92,16	81,63
SFNE+BESS (50%, 2 sata)	105,54	106,34	96,02

Tabela 5. Godišnje vrednosti CP za različite konfiguracije sistema za slučaj SFNE DeLasol

Konfiguracija sistema	2024 CP (€/MWh)	2025 CP (€/MWh)
SFNE (bez BESS)	76,22	66,09
SFNE+BESS (25%, 2 sata)	87,48	77,43
SFNE+BESS (50%, 2 sata)	98,30	88,47

Dobijeni rezultati pokazuju da integracija BESS značajno povećava ostvarenu tržišnu cenu hibridne elektrane. Efekat je izraženiji kod konfiguracije sa većom instalisanom snagom baterijskog sistema, što potvrđuje da veći odnos snage baterije i snage SFNE omogućava veći obim vremenskog pomeranja proizvodnje između perioda nižih i viših tržišnih cena.

Poređenje rezultata za model uniformno raspoređene SFNE flote Srbije i referentnu SFNE DeLasol pokazuje da je relativno povećanje CP nešto manje kod referentne elektrane. Razlog za to leži u činjenici da SFNE DeLasol ostvaruje značajno višu specifičnu proizvodnju, koja je reda veličine oko 1600 kWh/kWp godišnje, što je približno 25% više u odnosu na model uniformne SFNE flote za teritoriju Srbije.

Pošto BESS u oba slučaja radi pod istim tržišnim uslovima i prati sličan obrazac dnevne arbitraže, godišnji energetski izlaz BESS ostaje približno sličan. Međutim, zbog veće proizvodnje SFNE DeLasol, relativni odnos energije koja prolazi kroz BESS u odnosu na ukupnu proizvodnju hibridne elektrane je manji. Zbog toga je i relativni uticaj BESS na povećanje CP nešto niži nego u slučaju modela uniformne SFNE flote Srbije.

V ZAKLJUČAK

U radu je razvijen metodološki okvir za procenu ostvarene ponderisane tržišne cene proizvodnje (*capture price*) solarnih fotonaponskih elektrana u Srbiji u uslovima ograničene dostupnosti agregiranih satnih podataka o proizvodnji. U tu svrhu primenjen je pristup zasnovan na modelovanju uniformno raspoređene flote solarnih elektrana na teritoriji Srbije korišćenjem meteoroloških podataka ERA5 reanalize i satnih cena sa tržišta „dan unapred“ na berzi SEEPEX.

Dobijeni rezultati pokazuju da se CP solarnih fotonaponskih elektrana u Srbiji u periodu 2023–2025 smanjuje uprkos relativno stabilnim ili rastućim prosečnim tržišnim cenama električne energije. CP uniformne SFNE flote Srbije je opao sa 88,51 EUR/MWh u 2023. godini na 67,19 EUR/MWh u 2025. godini, dok je CR u istom periodu smanjen sa 85,55% na 62,29%. Ovaj trend ukazuje na prisustvo efekta kanibalizacije cena, pri čemu izvršena analiza u radu sugeriše da se deo ovog efekta prenosi na SEEPEX tržište putem prekogranične trgovine električnom energijom, odnosno da i tržišta sa relativno malim instaliranim PV kapacitetom, kao što je to u slučaju Srbije, mogu doživeti efekat kanibalizacije cena zbog integracije regionalnih tržišta električne energije.

Validacija modela izvršena je poređenjem sa stvarnim satnim podacima o proizvodnji referentne elektrane DeLasol, pri čemu su odstupanja između modelovanih i izračunatih vrednosti CP manja od 2%. Ovakav rezultat potvrđuje da pristup zasnovan na modelu uniformno raspoređene flote može predstavljati pouzdanu aproksimaciju proizvodnog profila solarne tehnologije na nivou države u situacijama kada agregirani podaci nisu dostupni.

U drugom delu rada analiziran je uticaj integracije baterijskog skladišta energije u hibridnoj konfiguraciji SFNE+BESS. Simulacije pokazuju da primena baterijskog skladišta može značajno povećati ostvarenu tržišnu cenu solarne proizvodnje. U slučaju modela uniformne flote povećanje CP dostiže približno 10–18% za konfiguraciju instalisane snage BESS od 25% instalisane snage SFNE, odnosno do oko 40% u slučaju konfiguracije snage instalisane snage BESS od 50% instalisane snage SFNE.

Poređenje sa referentnom elektranom pokazuje da je relativno povećanje CR nešto manje kod postrojenja sa višom specifičnom proizvodnjom. Ovaj rezultat ukazuje da relativni efekat baterijskog skladišta zavisi ne samo od strukture tržišnih cena već i od odnosa između proizvodnog profila SFNE i dimenzionisanja BESS.

Rezultati rada ukazuju da integracija baterijskog skladišta energije može predstavljati efikasan način povećanja tržišne vrednosti solarne proizvodnje u uslovima rastuće volatilnosti cena i izraženijeg dnevnog cenovnog raspona na tržištu električne energije.

Sa porastom udela varijabilnih obnovljivih izvora energije u elektroenergetskom sistemu povećava se potreba za fleksibilnim resursima koji mogu obezbediti usluge balansiranja sistema. U tom kontekstu, baterijska skladišta energije integrisana sa solarnim elektranama mogu predstavljati značajan resurs za pružanje balansnih usluga, što otvara dodatne mogućnosti za optimizaciju prihoda hibridnih elektrana. Stoga će dalja istraživanja, koja autori nameravaju da sprovedu, obuhvatiti razvoj modela optimizacije rada hibridnih elektrana koji, pored arbitraže na spot tržištu električne energije, uključuju i učešće na balansnom tržištu (tržište balansnih kapaciteta i balansne energije) kroz višeslojno ostvarivanje prihoda (eng. *value stacking*).

LITERATURA

[1] Hirth, L. The market value of variable renewables, Energy Economics, Vol. 38, pp. 218-236, 2013. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2013.02.004

[2] Faiman, D. Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 16, No. 4, pp. 307-315, 2008. https://doi.org/10.1002/pip.813

[3] Huld, T., Müller, R., Gambardella, A. A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa, Solar Energy, Vol. 86, No. 6, pp. 1803-1815, 2012. https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.03.006

[4] SEEPEX podaci o tržištu, https://seepex-spot.rs/day-ahead-market-data [pristupljeno 09.02.2026]

[5] MT-KOMEX d.o.o. podaci o projektu, https://mt-komex.co.rs/solarna-elektrana-delasol [pristupljeno 09.02.2026]

[6] Jowett, P. Serbia installs 134.3 MW of solar in 2025, PV Magazine, 2026. https://www.pv-magazine.com/2026/01/27/serbia-installs-134-3-mw-of-solar-in-2025/ [pristupljeno 09.02.2026.]

[7] IRENA, Renewable Capacity Statistics 2024, https://www.irena.org/publications [pristupljeno 09.02.2026]

[8] IEA, Grid-scale storage tracking report 2023, https://www.iea.org/reports/grid-scale-storage [pristupljeno 10.02.2026]

[9] Bolinger, M., Seel, J., Kemp, J.M., Warner, C., Katta, A., Robson, D. Utility-scale solar 2023 edition: empirical trends in project technology, cost, performance, and PPA pricing in the United States: Report, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2023. https://emp.lbl.gov/publications/utility-scale-solar-2023-edition [pristupljeno 10.02.2026]

[10] Schmidt, O., Melchior, S., Hawkes, A., & Staffell, I., Projecting the future levelized cost of electricity storage technologies, Joule, Vol. 3, No. 1, pp. 81-100, 2019. https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.12.008

[11] BLAST: Battery Lifetime Analysis and Simulation Tool Suite. https://www.nlr.gov/transportation/blast [pristupljeno 10.02.2026]

AUTORI

mr Željko Marković, dipl. inž. el., SCITECH d.o.o. Beograd, markovic@scitech.rs, ORCID 0009-0009-4661-4917
Dejan Stojčevski, dipl. inž. el., SEEPEX a.d. Beograd, dejan.stojcevski@seepex-spot.rs, ORCID 0009-0006-2389-4264
Miloš Kostić, dipl. inž. maš., MT KOMEX d.o.o. Beograd, milos.kostic@mt-komex.co.rs, ORCID 0009-0007-4360-0267

Assessment of Capture Price and the Impact of Battery Energy Storage Integration on the Market Value of Solar Photovoltaic Power Plants in Serbia

Abstract – The increasing penetration of solar photovoltaic power plants (SPPs) and the growing volatility of wholesale electricity prices require revenue assessments that go beyond the simple use of average annual market prices. The achieved production-weighted market price (CP, Capture Price) represents a key indicator of the actual market value of PV generation. This paper presents an assessment of the CP of solar photovoltaic power plants in Serbia for the period 2023–2025. Due to the lack of publicly available aggregated hourly production data for all SPPs in Serbia, a methodological approach based on the ERA5 meteorological reanalysis published by the Copernicus Climate Change Service was developed to model a spatially uniform fleet of SPPs across the entire territory of Serbia. Realized hourly day-ahead market prices from the national power exchange SEEPEX were used for the calculation. The methodology was validated through comparison with measured hourly production data from a reference power plant for 2024 and 2025, with deviations of calculated values of the CP below 2%, confirming the robustness of the proposed approach. Furthermore, the impact of integrating a Battery Energy Storage System (BESS) was analyzed under two configurations (nominal power equal to 25% and 50% of the installed PV capacity, with a two-hour storage duration), using a simulation of an optimal dispatch algorithm assuming perfect foresight of future prices. The results indicate that BESS integration increases the CP but simultaneously enlarges the deviations of obtained values for the CP between the spatially uniform SPP fleet model and plant-level results for the reference facility (5–8%). The proposed framework provides a transparent and replicable methodology for assessing the market value of solar photovoltaic power plants and hybrid SPP (with BESS) systems in the Serbian electricity market in the coming years.

Index Terms – PV power plants, ERA5, Capture price, SEEPEX, BESS (battery energy storage system)

Rad primljen: 31.03.2026., prihvaćen: 21.08.2026.