

Милена Лекић¹, Милорад Куч¹, Жељко Ђуришић²



Упоредна анализа оперативних карактеристика и ефеката коришћења бифацијалних вертикално постављених и монофацијалних јужно оријентисаних фотонапонских панела – студија случаја Пештерске висоравни

¹ WSP, Београд*

² Универзитет у Београду – Електротехнички факултет, Београд

<https://doi.org/10.18485/epij.2024.2.2.6>

Оригинални научно-истраживачки рад

Кључне поруке

- Предности вертикално постављених бифацијалних фотонапонских панела у односу на јужно оријентисане монофацијалне, сагледане на основу компатибилности њихових дневних и годишњих дијаграма производње са одговарајућим дијаграмима потрошње и дијаграмима цена електричне енергије на тржишту
- Уочавање предности комбинованих система ове две врсте фотонапонских електрана због готово константне излазне снаге током обданице и ради максималног искоришћења постојећих капацитета преносних система
- Употреба вертикално постављених фотонапонских панела ради задржавања пољопривредних потенцијала земљишта

Кратак садржај

Бифацијални вертикално постављени соларни панели представљају техничко решење којим се врши конверзија соларне енергије у електричну на начин који превазилази одређене недостатке конвенционалних монофацијалних јужно оријентисаних соларних панела, пре свега по питању дневних и годишњих дијаграма производње. У овом раду анализирани су дијаграми производње фотонапонске електране са јужно оријентисаним монофацијалним панелима и дијаграми производње фотонапонске електране са бифацијалним панелима оријентисаним у правцу исток–запад, уз осврт и на оријентацију север–југ. Такође, анализирана је и њихова корелација са дијаграмом потрошње и дијаграмом цене електричне енергије на тржишту. Анализа ће обухватати утицај снежних падавина, температуре и запрљања модула. Такође ће бити сагледан и ефекат заузимања земљишта и могућност његовог коришћења у пољопривредне сврхе. Анализе су извршене уз претпоставку инсталације на реалној локацији на Пештерској висоравни, а прорачуни су извршени коришћењем реалних података о инсолацији и реалних параметара фотонапонских модула.

Кључне речи

Бифацијални фотонапонски модули, вертикални фотонапонски панели, монофацијални фотонапонски модули

Примљено: 1. августа 2024. Рецензирано: 26. августа 2024.
Измењено: 28. августа 2024. Одобрено: 5. септембра 2024.

* Кореспондирајући аутор: Милена Лекић, +381 61 279 40 06

Имејл: milena.lekic@gmail.com

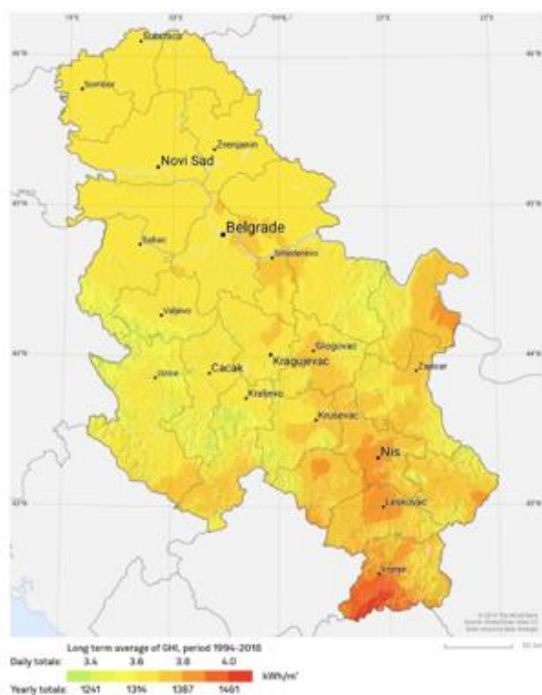
Нова афилијација: Mott MacDonald

Напомена:

Чланак представља проширену, унапређену и додатно рецензирану верзију рада „Компаративна анализа фотонапонских електрана са монофацијалним јужно оријентисаним и бифацијалним вертикалним фотонапонским панелима на Пештерској висоравни“, награђеног у Студијском комитету СТК-Ц6 Дистрибутивни системи и дистрибуирана производња, на 36. Саветовању CIGRE Србија, 22-26. маја 2023.

1. УВОД

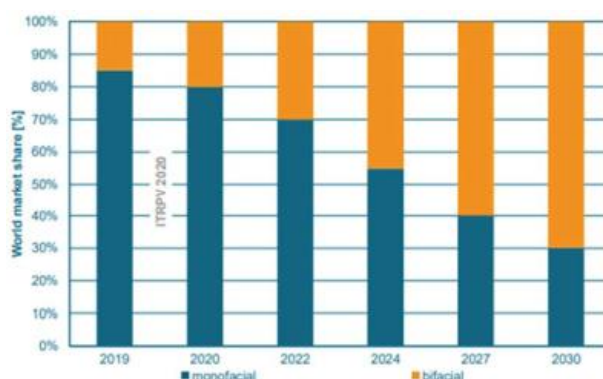
У овом раду спроведене су анализе енергетских и економских показатеља фотонапонских електрана различитих технологија које су инсталисане на локацији Пештерске висоравни. Пештерска висораван је посебно погодна јер је, с обзиром на надморску висину која се креће између 1150 и 1492 m, карактеришу температуре ниже од просечних током целе године, што поспешује ефикасност фотонапонских панела. Такође су обилне снежне падавине у току зимских месеци. Утицај снега на монофацијалне јужно оријентисане панеле може бити проблематичан због прекривања активне површине, док за вертикалне панеле то не представља проблем, чак и поспешује производњу, због пораста рефлектоване компоненте ирадијације соларног зрачења (алbedo свеже нападалог снега износи и до 0,9). Из ових разлога за анализу је одабрана реална локација на југозападу Србије, у области Пештерске висоравни (Долиће, Сјеница), где је глобална хоризонтална ирадијација израженија, што се види на Слици 1. При анализи коришћен је програмски алат PVsyst. Анализирани су дијаграми производње из монофацијалних јужно оријентисаних фотонапонских панела и из бифацијалних фотонапонских панела са активним површинама оријентисаним у правцу исток–запад, уз осврт и на оријентацију север–југ. Такође, анализирана је и њихова корелација са дијаграмима потрошње у датом региону и дијаграмима цена електричне енергије на тржишту.



Слика 1. Мапа глобалне хоризонталне ирадијације Србије (без територије Косова и Метохије), [1]

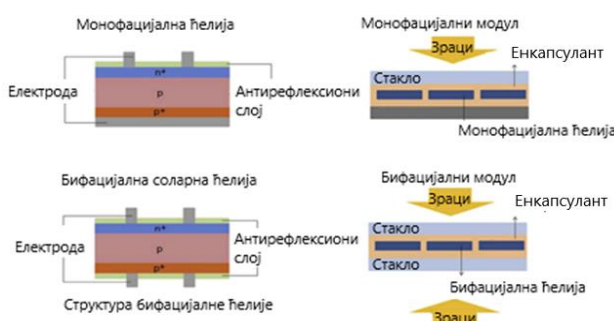
2. БИФАЦИЈАЛНИ ФОТОНАПОНСКИ ПАНЕЛИ

На основу расположивих анализа електрична енергија добијена из соларних електрана у будућности ће бити знатно јефтинија од енергије добијене помоћу ветра, па нова истраживања на пољу конверзије сунчеве енергије у електричну оправдавају писање овог рада. Циљ транзиције у производњи електричне енергије јесте да се до 2030. године 50% електричне енергије добија из обновљивих извора, а до 2050. чак 80%, [2]. Још 1980. године је доказано да бифацијални фотонапонски панели могу имати између 42% и 63% већу излазну снагу од конвенционалних монофацијалних панела и верује се да ће до 2030. бифацијални панели чинити 70% свих доступних панела на тржишту. Слика 2 приказује очекивани тржишни тренд бифацијалних ћелија.



Слика 2. Очекивани тренд удела бифацијалних и монофацијалних ћелија на светском тржишту, [3]

Главна разлика у структури бифацијалних у односу на монофацијалне ћелије јесте облик електроде са задње стране панела. Она је код монофацијалних панела у облику плоче, односно покрива активни део ћелије, док је код бифацијалних ћелија она у облику „прстију” проводног материјала, као и са предње стране панела. Друга битна разлика јесте у спољном слоју модула, који је код монофацијалних панела затварао задњу страну, а сада је најпопуларнија опција са стаклом са обе стране, што се може видети на Сл. 3.



Слика 3. Упоредне структуре монофацијалних и бифацијалних ћелија и панела, [4]

Бифацијални фотонапонски панели се користе у различите сврхе, па тако разликујемо више подела, Слика 4.



Слика 4. Примене бифацијалних панела

Бифацијални фотонапонски панели монтирани на земљи најчешће су коришћен тип система за комерцијалне фотонапонске системе. Може се произвести јединствени енергетски профил у зависности од начина монтаже панела. Уколико се користе у комбинацији са пољопривредом ови панели могу донети низ бенефита, јер се за одређене усеве којима не одговара прекомерно сунчево зрачење утиче на раст приноса, смањење температуре околног земљишта и успорава се прекомерно исушивање земљишта.

Бифацијални панели монтирани на објектима су добри за употребу на равним, зеленим крововима када се монтирају вертикално, јер на тај начин подржавају и раст вегетације, док за косе кровове нису повољни.

Бифацијални панели монтирани приликом изградње објекта могу бити полупрозрачни (Слика 5). На тај начин користе део дневне светлости и за осветљавање просторије. Могу се користити као фасаде са побољшаном вентилацијом, чиме доприносе смањењу потрошње електричне енергије за расхлађивање и утичу на естетски изглед објекта.



Слика 5. Полупрозрачни бифацијални фотонапонски панели интегрисани у објекту, [5]

2.1 Фактор бифацијалности и бифацијална добит

Фактор бифацијалности се дефинише као однос између ефикасности задње стране панела и ефикасности предње стране панела, или као однос излазне снаге задње стране панела и излазне снаге предње стране панела:

$$Bifaciality = \frac{\eta_{rear}}{\eta_{front}} = \frac{P_{STC, rear}}{P_{STC, front}} \quad (1)$$

За дату инсталацију, основно је прецизно предвидети очекивану производњу електричне енергије и бифацијалну добит (*Bifacial gain*, BG) за различите могуће геометрије и различите структуре соларних ћелија.

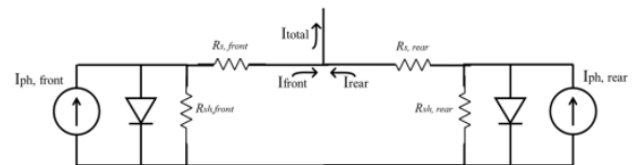
BG се дефинише као однос између вишка енергије коју производи бифацијални фотонапонски панел и енергетске добити стандардног монофацијалног фотонапонског панела, израчунат помоћу следеће једначине.

$$BG = \frac{e_{bi} - e_{mono}}{e_{mono}} \quad (2)$$

где су e_{bi} енергетска добит бифацијалног фотонапонског панела и e_{mono} – енергетска добит стандардног монофацијалног панела.

2.2 Модел бифацијалне ћелије

Електрични модел бифацијалних ћелија заправо представља два модела монофацијалне ћелије повезана у паралелу, што се може видети на Слици 6.



Слика 6. Електрични модел бифацијалне ћелије, [6]

Задња страна ћелије у случају оријентације панела ка југу хвата део ирадијације који је последица рефлектовања директне и дифузне ирадијације о подлогу. С тим у вези његова вредност ће у многоме зависити од рефлексионих својстава подлоге, односно албеда.

2.3 Алbedo

Алbedo је дифузна рефлектована ирадијација са земље. Истраживања показују да бифацијални фотонапонски панели могу испоручити и до 8,3% више енергије захваљујући алbedo ефекту (снег, шљунак...), али и да се оптималном висином постављања добија и додатних 3,1% енергије, [7].

Табела I приказује вредности албеда за различите површине, одакле се види да је свеж снег једна од

најповољнијих површина за бифацијалне фотонапонске панеле.

Табела 1. Вредности албеда за различите површине, [7]

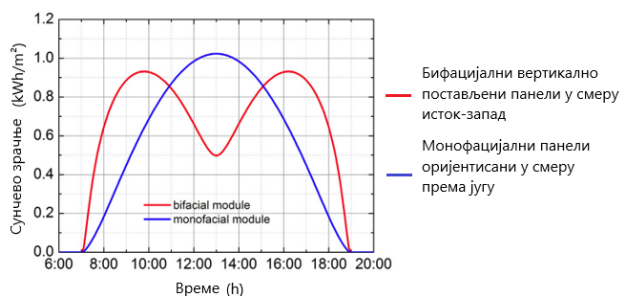
Површина	Вредности албеда
Мокри песак	0,09
Шљунак	0,12
Асфалт	0,125
Вода	0,14
Дрво	0,15
Суви песак	0,18
Трава	0,205
Бетон	0,225
Камен	0,275
Бели шљунак	0,65
Стари снег	0,75÷0,8
Свеж снег	0,8÷0,88

Албеда највише утиче на вертикално постављене бифацијалне панеле. Утицај вредности албеда на производњу електричне енергије из монофацијалних јужно оријентисаних панела може се сматрати занемарљиво малим с обзиром на то да су оријентисани ка извору светлости. Бифацијални јужно оријентисани панели осећају утицај промене албеда али свакако мање од вертикалних зато што код њих албеда има утицај само на добит енергије са задње стране панела која хвата значајно мању ирадијацију.

Високе вредности албеда такође повољно утичу на енергетску добит у облачним данима, односно чак и уколико не постоји значајна директна ирадијација, енергетска добит може бити прихватљива уколико се дифузна ирадијација и њене рефлектоване компоненте добро искористе.

2.4 Основне карактеристике вертикалних фотонапонских система

Главна мотивација за коришћење вертикално постављених бифацијалних фотонапонских панела са оријентацијом исток–запад (VBPV E-W) јесте њихов дневни дијаграм производње који је приказан на Слици 7, [4].



Слика 7. Пример дневног дијаграма производње из вертикално постављеног панела са оријентацијом исток–запад и јужно оријентисаног монофацијалног панела, [4]

Оваква карактеристика значајно се боље поклапа са дневним дијаграмом потрошње у односу на монофацијалне панеле, а такође и даје додатну енергетску добит. Још једна битна примена јесте у „пеглању“ дијаграма производње система са великим учинком електрана са монофацијалним јужно оријентисаним панелима (MPV) јер су максимуми производње из ових бифацијалних електрана временски померени у односу на максимум монофацијалних електрана.

Бенефит вертикално постављених фотонапонских панела је пружање могућности искоришћења земљишта на којем се налазе и у друге сврхе, као што је на пример пољопривреда, или земљиште за испашу. Вертикално постављени панели заузимају релативно мали простор, не угрожавају биљни и животињски свет и њихова растојања могу се подешавати у односу на потребе употребе земљишта, [8].

У поређењу са јужно оријентисаним соларним панелима очекивана добит за вертикално постављење бифацијалне панеле са оријентацијом исток–запад већа је за 5%÷15%, што зависи од фактора бифацијалности модула, растојања између редова, висина инсталација и још других параметара који ће бити анализирани у даљем тексту.

3. ОДАБРАНА ОПРЕМА ФОТОНАПОНСКИХ СИСТЕМА

Симулиране електране су појединачних снага од по 1 MW, а опрема је одабрана на следећи начин: Фотонапонски панели (монофацијални и бифацијални) су идентичних карактеристика:

- $V_{mpp} = 37,25 \text{ V}$,
- $P_{mpp} = 535 \text{ Wp}$,

За фактор бифацијалности усвојено је 100%, а оправданим га чини повећана потражња и технолошки напредак.

Одабрани инвертори су номиналне снаге 100 kW, појединачно и максималне ефикасности од 98,8%, који су коришћени и у монофацијалном и у бифацијалним системима. Број таквих инвертора по систему износи 10.

Према максималном напону и струји инвертора направљена је конфигурација са 16 редно везаних фотонапонских панела што чини 120 таквих стрингова.

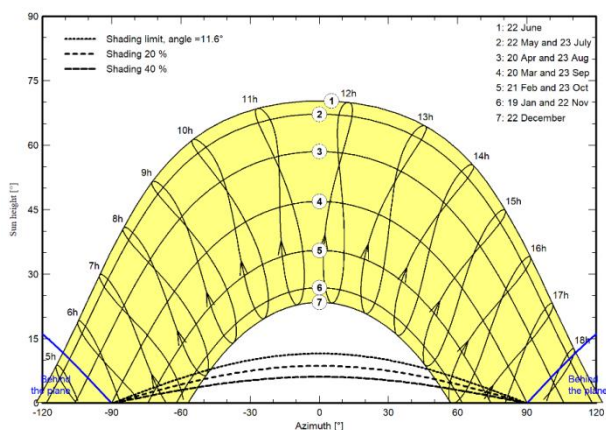
4. ПОДЕШЕЊА ПАРАМЕТАРА СИМУЛАЦИЈЕ

На нивоу читавог пројекта дефинисана је локација на основу које је синтетисана метеоролошка база преко које се израчунавају инсолација и сви остали метеоролошки подаци, као што су температура, облачност, падавине и слично. Други параметар који је усвојен за цео пројекат је албеда за који се задају месечне вредности. С обзиром на то да су снежне

падавине у зимском периоду обилне, тада је задата вредност $0,4 \pm 0,7$, док је током лета усвојена вредност за травнате површине од 0,2.

4.1 Монофацијални јужно оријентисани фотонапонски панели

Азимутни угао за јужно оријентисане панеле износи 0° , док се оптимални нагибни угао одређује уз помоћ алата PVsyst, који је у овом случају за задати размак између редова од 10 m пронашао да је оптималан нагиб 30° , што је и усвојено. За дату локацију и оријентацију може се генерисати и годишња путања Сунца (Слика 8).



Слика 8. Годишња путања Сунца за монофацијалне јужно оријентисане панеле на циљној локацији

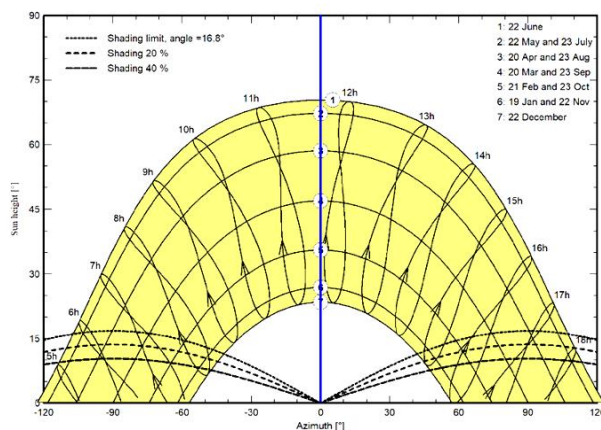
Са слике изнад можемо прочитати када због међусобног засенчења панела доступна ирадијација неће бити искоришћена. Као што је и очекивано, на цртежу се види да ће до међусобног засенчења доћи у току зиме, када је сунце ниско и то значи да у раним јутарњим и вечерњим часовима губимо део енергије због засенчења. Годишњи фактор запрљања панела дефинисан је између 3% и 5%, где је 5% дефинисано за зимске месеце када је потребно чистити снег са панела. Остали параметри система су подешени у оквиру софтверског алата на уобичајене вредности.

4.2 Вертикално постављени бифацијални фотонапонски панели

Азимутни угао за вертикалне панеле са активним површинама оријентисаним у правцу исток–запад има вредност -90° и дефинише ситуацију када је предња страна панела окренута ка истоку. У нашем конкретном случају то није релевантно јер је усвојен фактор бифацијалности од 100%, па смо азимутном углу могли доделити и вредност 90° , односно када је предња страна панела окренута ка западу. За вертикално постављене панеле са активним површинама оријентисаним у правцу југ–север азимутни угао износи 0. Нагибни угао за обе варијанте је 90° , што и дефинише вертикалан положај ових

панела. Усвојено је растојање између редова панела од 10 m како би два анализирани решења била упоређива у погледу искоришћења земљишта.

За варијанту вертикалних панела оријентације у правцу исток–запад (Слика 9), приказује годишњу путању Сунца. Можемо уочити приметно већи утицај међусобног засенчења панела изазван самом геометријом таквог система.



Слика 9. Годишња путања Сунца за вертикалне панеле оријентисане у правцу исток–запад, инсталисане на циљној локацији

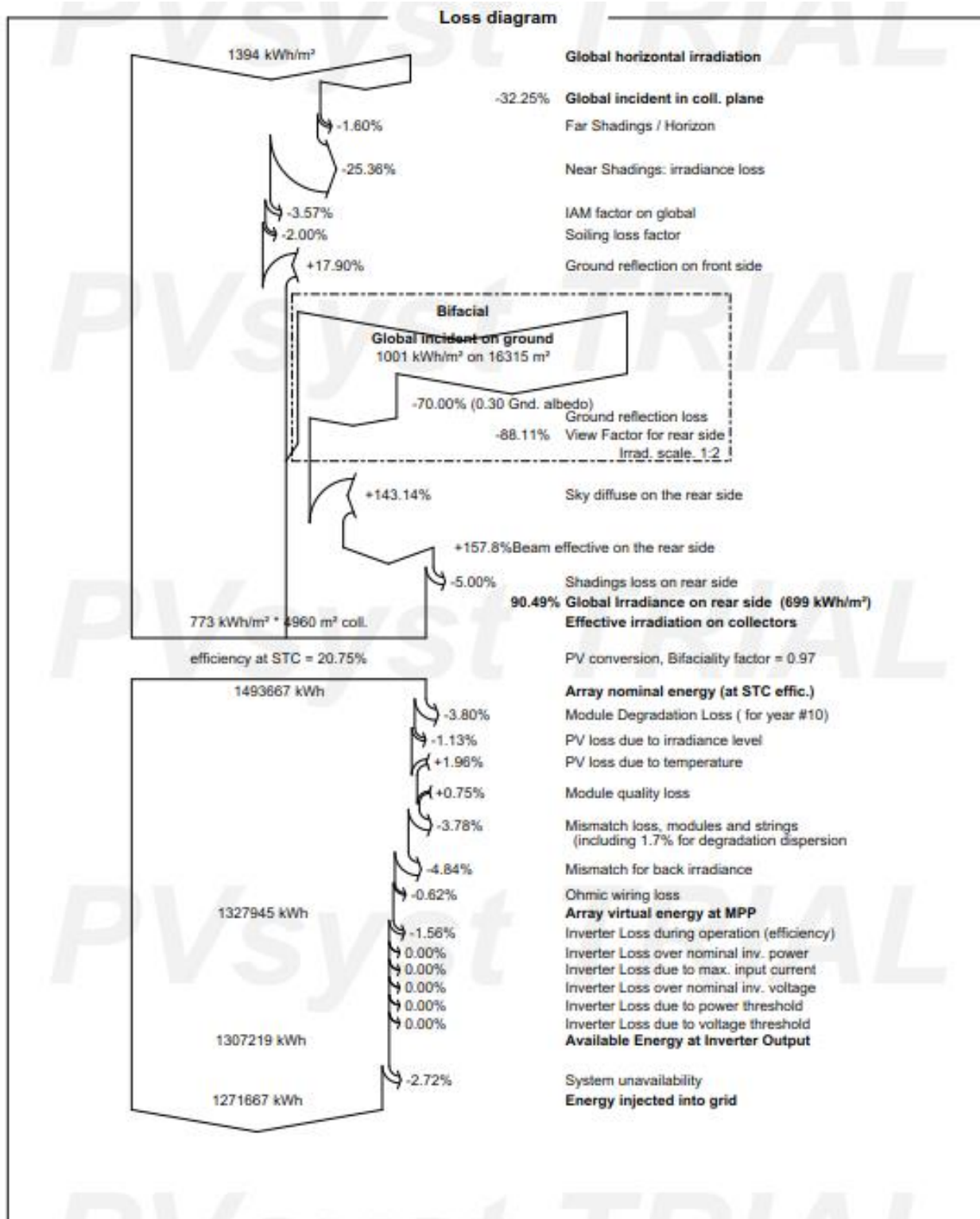
Усвојен је годишњи фактор запрљања од 2%, с обзиром на то да се на вертикалним панелима готово не акумулира запрљање, као ни снег, што представља велику предност у односу на монофацијалне јужно оријентисане панеле. Значајна је и расподела губитака целог система овакве варијанте (Слика 10).

5. АНАЛИЗА ПРОФИЛА СНАГЕ ИНЈЕКТИРАНЕ У МРЕЖУ

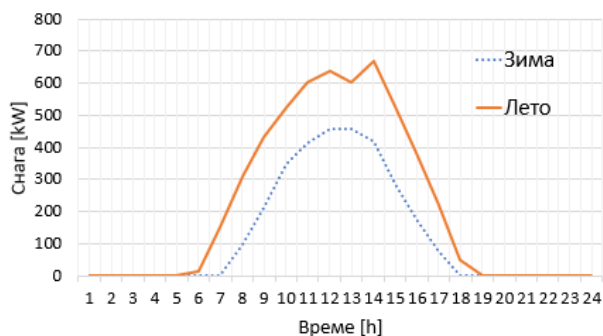
На основу наведених улазних података симулирана је снага инјектирана у мрежу за наведене варијанте фотонапонских електрана. Биће приложени прорачунати карактеристични дијаграми за летњи и зимски период, на узорку од по два месеца. За зиму су узети јануар и фебруар, а за лето јул и август, као месеци са најиспољенијим релевантним карактеристикама за дато годишње доба.

5.1 Монофацијални јужно оријентисани фотонапонски панели

Слика 11 приказује карактеристични дијаграм производње из конвенционалне фотонапонске електране. Као што видимо вршина вредност производње појављује се око поднева. У зимском периоду производња је значајно мања него лети, како због мање инсолације тако и због краћег трајања дана и чињенице да се сунце налази ниже на небу у току зимског периода, што не омогућава максимално искоришћење за фотонапонске панеле са нагибом од 30° , [9].



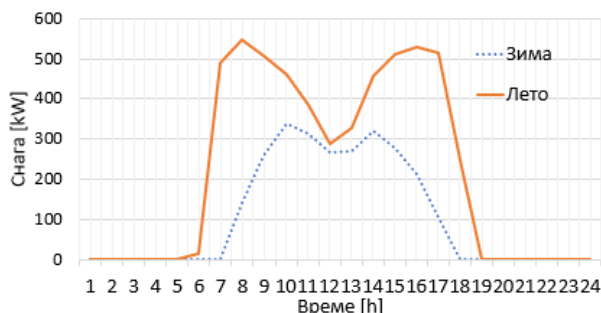
Слика 10. Дијаграм губитака вертикално постављених бифацијалних панела. Овај дијаграм је генерисан у наменском програмском алату, уносом параметара система који су описани у претходним поглављима и према упутствима из [10].



Слика 11. Карактеристични дневни дијаграм производње из електране са монофацијалним панелима

5.2 Бифацијални вертикално постављени панели са оријентацијом исток–запад

Слика 12 приказује карактеристични дијаграм производње из електране са вертикално постављеним бифацијалним панелима оријентисаним исток–запад. Расподела снаге у току дана је знатно другачија него у претходном случају, што је и очекивано. Вршне снаге појављују се два пута у току дана, што је значајно испољеније у летњем периоду. Тада је први максимум снаге пре подне око 8 сати, а други после подне, око 16 сати. У току зиме сунце је ниско и већи део времена је на југу тако да ова карактеристика није толико изражена, па већи утицај има дифузиона компонента, пре свега изазвана великом вредношћу албеда за овај део године.

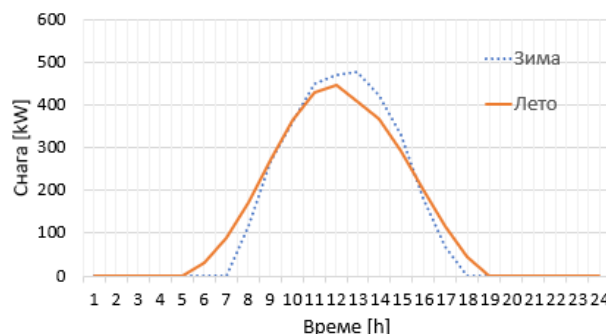


Слика 12. Карактеристични дневни дијаграм производње електране са вертикално постављеним бифацијалним панелима оријентисаним у правцу исток–запад

5.3 Бифацијални вертикално постављени панели са оријентацијом југ–север

У овом случају губимо карактеристику два максимума у току дана, јер већински удео директне ирадијације пада на јужно оријентисану страну панела, а северна страна претежно „хвата” дифузиону компоненту изазвану рефлексијом од облака или земље. Занимљиво је уочити да у овом случају зими имамо већу вршну снагу него лети, изазвану високим албедом и чињеницом да је вертикално постављени панел оријентисан ка југу погодан за прихватање ирадијације зимског сунца које се налази ниско на

хоризонту. Претходно описан случај је приказан графиком (Слика 13).



Слика 13. Карактеристични дневни дијаграм производње из електране са вертикално постављеним бифацијалним панелима оријентисаним у правцу југ–север

5.4 Утицај растојања између редова на излазну снагу VBPV

Међусобно засенчење модула код електрана са вертикално постављеним соларним панелима изразито утиче на излазну снагу електране. Са аспекта излазне снаге најбоље решење било би размаћи панеле што више, али са економског аспекта нас ограничава фактор искоришћења терена. Примена вертикалних панела на начин да се земљиште на ком су инсталирани несметано може користити и у сврхе пољопривреде или испаше стоке могла би да доведе до занемаривања овог фактора, с обзиром на то да би дата површина имала двоструку функцију. У том случају размаци између редова би се адаптирали потребама обраде земље, тј. машина које би требало да пролазе између панела.

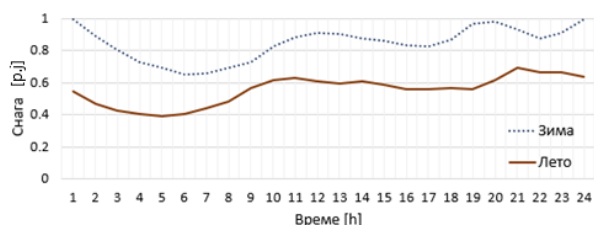
Анализирањем се примећује да при смањењу размака на 5 m, вршне вредности снаге у току летњег дана опадају за око 10%, док за повећање на 20 m та разлика износи око 5%. За зимски период је овај ефекат још израженији утолико што се сунце налази ниско на хоризонту, те су и сенке веће.

Када расположивост земљишта не би била спорна, оптимално решење за вертикално постављене панеле би био што већи размак између редова. У овој симулацији ипак је задржан размак од 10 m као рационално решење и ради упоредивости са електраном са монофацијалним панелима, односно ради заузимања једнаке површине земљишта.

6. АНАЛИЗА ПРОФИЛА ПОТРОШЊЕ И ЦЕНА ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ НА ТРЖИШТУ

Потрошња која је моделована одговара реалним подацима о потрошњи на дистрибутивном нивоу у датом региону. Прорачунати су карактеристични дијаграми за летњи и зимски период (Слика 14), на

узорку од по два месеца. За зиму су узети јануар и фебруар, а за лето јул и август, како би корелирали са карактеристичним дијаграмима производње из фотонапонских панела. На графику су приказане снаге потрошње нормализоване у односу на максималну зимску потрошњу.



Слика 14. Карактеристични дневни дијаграми потрошње електричне енергије

У потрошњи такође постоји извесна правилност на дневном, али и на годишњем нивоу. Зими су снаге потрошње веће, пре свега због електричног грејања. На дневном нивоу, као што се види, имамо један максимум између 9 сати и 11 сати и други између 18 сати и 20 сати, који је посебно изражен у зимском периоду. Још један скок се може видети око поноћи, што би се могло објаснити двотарифним системом наплате електричне енергије у домаћинствима, која је први примењени вид управљања потрошњом у нашем систему.

Цене електричне енергије на тржишту зависе од много фактора. Један од њих је фактор потражње, што значи да ће цене на тржишту пратити тренутне потребе. Графиком са Сlike 15 приказане су нормализоване вредности у односу на летњи, односно зимски максимум. Уобичајено је да су цене електричне енергије у зимском периоду изразито веће него у летњем, што се објашњава већом потражњом, док је на датом графику акценат на дневној флукутацији цена.



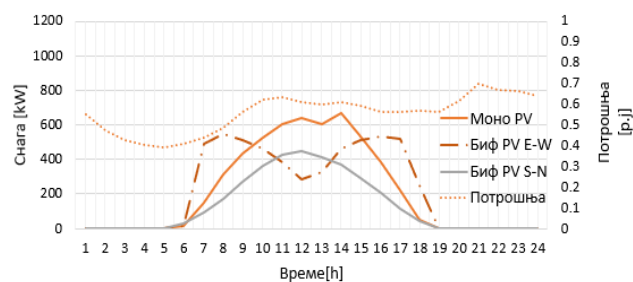
Слика 15. Дневни дијаграм цене електричне енергије на тржишту

7. АНАЛИЗА ТЕХНИЧКИХ И ЕКОНОМСКИХ ПАРАМЕТАРА ФОТОНАПОНСКИХ ЕЛЕКТРАНА РАЗЛИЧИТИХ ТЕХНОЛОГИЈА

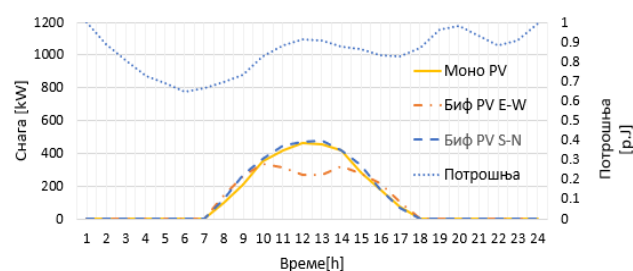
Прва спроведена анализа приказује карактеристичне дневне дијаграме производње из ова три типа фотонапонских електрана за летњи и зимски дан, као и њихов однос са карактеристичним дијаграмом потрошње. Слика 16 приказује карактеристичне дијаграме за летњи дан, а Слика 17 за

карактеристичан зимски дан. У току летњих месеци вертикални панели са оријентацијом у правцу југ–север имају значајно слабије енергетске карактеристике, јер им се облик у току дана поклапа са оним од монофацијалних панела, а вредности су свакако ниже. У току зимских месеци вертикални панели са оријентацијом у правцу југ–север имају нешто бољи дијаграм производње од монофацијалних јужно оријентисаних панела под нагибним углом од 30°.

Што се тиче дијаграма вертикалних панела са оријентацијом исток–запад, вршне вредности су нешто мање од максимума који достижу монофацијални панели, међутим, њихов распоред у току дана погодује потрошњи. Други максимум овог дијаграма који се јавља у поподневним часовима поклапа се са поподневним скоком у потрошњи. Такође, чињеница да се први максимум овако оријентисаног панела достиже у раним јутарњим часовима погодује првом јутарњем повећању потрошње. Иако се не поклапа у потпуности са максимумом потрошње који стиже нешто касније, њихов допринос у раним јутарњим часовима може бити повољан допринос мрежи после ноћног затишја потрошње.



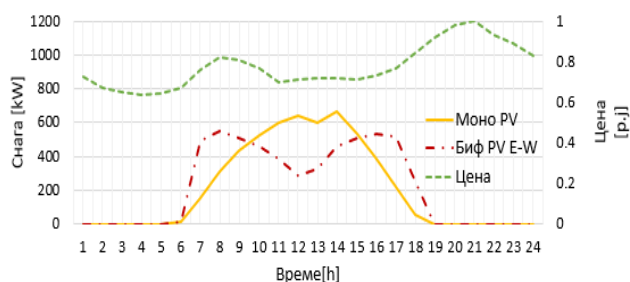
Слика 16. Карактеристични летњи дневни дијаграм производње PV електрана и потрошње



Слика 17. Карактеристични зимски дневни дијаграм производње PV електрана и потрошње

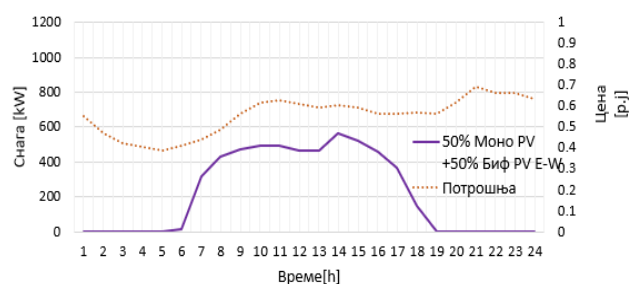
Значајно је такође упоредити расположиву производњу из ових типова фотонапонских електрана са дневним дијаграмом цена. Може се уочити да први максимум криве дијаграма производње бифацијалног вертикалног панела, оријентисаног у правцу исток–запад, пада у период јутарњих високих цена електричне енергије на тржишту, што може значајно допринети исплативости улагања у овакве електране (Слика 18).

На графицима се може приметити да су произведене снаге електране са бифацијалним вертикалним панелима оријентисаним у правцу исток–запад и електране са монофацијалним панелима међусобно комплементарне, што може бити врло корисно са аспекта мреже. Наиме, уз претпоставку да ће се на Пештерској висоравни у скорије време градити конвенционалне фотонапонске електране са прикључењем на мрежу, у таквом систему би постојање електране са вертикално постављеним панелима оријентисаним у правцу исток–запад могло да има више бенефита. Комбинација ова два типа електрана би дала практично заравњен дијаграм производње у току обданице.



Слика 18. Карактеристични летњи дневни дијаграм прозводње PV електрана и цене електричне енергије

Приказан је и случај када бисмо 50% предвиђеног капацитета планиране електране извели са монофацијалним јужно оријентисаним панелима и 50% са вертикално постављеним бифацијалним панелима оријентисаним исток–запад (Слика 19). Скалирани су на 50% ради поређења са претходним графицима.

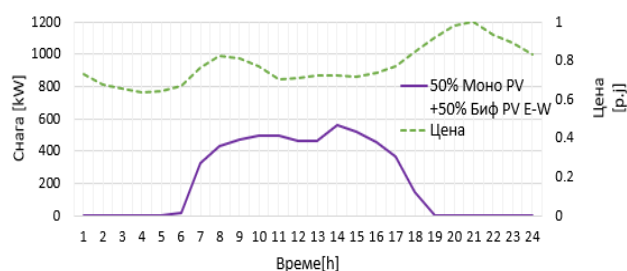


Слика 19. Карактеристични летњи дневни дијаграм производње збира 50% MPV и 50% VBPV E-W и потрошње

У овом случају можемо видети да је максимум монофацијале електране „испеглан”, односно вршна снага оваквог система мања је од случаја када имамо 100% удела монофацијалних фотонапонских панела у електрани, а остатак графика поравнат је тако да се од 8 сати до 16 сати у мрежу инјектира готово константна снага. Још један бенефит суперпонирања ове две врсте електрана је што у случају потребе инсталирања додатне електране у систем у ком већ постоји инсталиран значајан капацитет соларних електрана са монофацијалним панелима, при изградњи додатне електране са бифацијалним вертикалним

фотонапонским панелима, оријентације исток–запад, уместо монофацијалних фотонапонских панела умањује се проблем потребе за додатним преносним капацитетима система који треба да прими ту енергију. Разлог за то је, као што смо видели на овом примеру, што се та додатна снага производи већински у различитим периодима дана у односу на електрану са искључиво монофацијалним панелима, што омогућава потенцијалну употребу постојећег преносног капацитета или евентуално благо повећање истог.

Такође, заједничко учешће ова два типа фотонапонских електрана може допринети ефикасном праћењу дијаграма цена на тржишту електричне енергије у току летњег дана, као што се види (Слика 20).



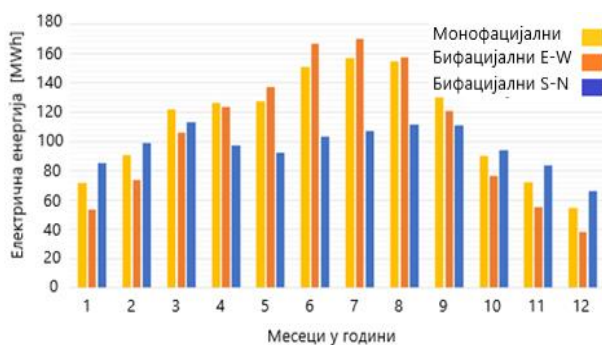
Слика 20. Карактеристични летњи дневни дијаграм прозводње збира 50% MPV и 50% VBPV E-W и цене електричне енергије

За зимски период године, Слика 17, види се један значајан бенефит вертикалних електрана са оријентацијом у правцу југ–север, а то је да у току зиме ови панели достижу већу вршну снагу и у дужем временском периоду од монофацијалних панела. Као што је поменуто раније у тексту, у току зиме сунце се налази ниско на хоризонту што се најбоље може искористити постављањем панела вертикално, ка југу, док северна страна скупља дифузну компоненту. Ово може бити значајно из разлога што је потрошња већа у току зиме, као и цене електричне енергије.

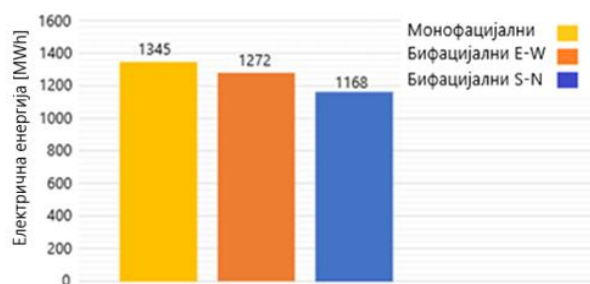
Наредна анализа односи се на годишњу произведену енергију за сва три поменута типа електрана. На наредном графику (Слика 21) може се видети количина произведене енергије по месецима, док Слика 22 приказује укупну количину произведене електричне енергије за целу типичну годину.

На графику са Сlike 21 може се потврдити претходна констатација да вертикално постављени бифацијални панели, оријентације у правцу југ–север, предњаче по производњи у зимским месецима, док у летњим месецима највише енергије производе вертикално постављени бифацијални панели, оријентације у правцу исток–запад.

На годишњем нивоу (Слика 22), са усвојеним параметрима система, највише енергије производе јужно оријентисани монофацијални панели, вертикално постављени панели са оријентацијом у правцу исток–запад производе око 5% мање енергије, а са оријентацијом у правцу север–југ око 15% мање.



Слика 21. Произведена електрична енергија за различите типове PV електрана по месецима



Слика 22. Годишња произведена електрична енергија за различите типове PV електрана

Имајући у виду већу тржишну вредност просечног MWh произведеног у вертикалним бифацијалним електранама, потребно је извршити детаљне прорачуне економских параметара на основу којих би се фаворизовало оптимално решење. Посебно треба истаћи да вертикалним постављањем панела на пашњацима, као што је случај на циљној локацији на Пештерској висоравни, земљиште практично не губи пољопривредну вредност.

8. ЗАКЉУЧАК

Из претходно одрађених анализа може се доћи до закључка да електране са вертикално постављеним панелима различитих оријентација могу бити оптималан избор у односу на постављене захтеве. Вертикални панели са активним површинама оријентисаним у правцу исток–запад посебно су погодни за уклапање са дневним дијаграмом потрошње а самим тим и са дневним дијаграмом цена. Највећу предност у односу на монофацијалне панеле испољавају у летњем периоду. Вертикални панели са оријентацијом у правцу југ–север показали су се као оптималан избор по питању дијаграма производње у зимском периоду, где такође могу допринети економској добити и подмирењу потрошње, боље од осталих конфигурација. Са аспекта мреже и искоришћења њених капацитета, оптимално је решење са комбинацијом монофацијалних јужно оријентисаних панела и вертикалних панела оријентисаних у правцу исток–запад. Значајан је и ефекат заузимања земљишта и могућност његовог коришћења у пољопривредне сврхе

који фаворизује употребу вертикалних панела. Будуће поље истраживања би могле бити и анализе могућности пројектовања оријентације вертикално постављених панела тако да одговарају одређеном профили производње електричне енергије.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] SOLARGIS, <https://solargis.com/>
- [2] Aydan Garrod: “A Review of Bifacial Solar Photovoltaic Applications”, 2023
- [3] International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 2021 Results, 2022.
- [4] Siyu Guo, Timothy Michael Walsh, Marius Peters: “Vertically Mounted Bifacial Photovoltaic Modules: A Global Analysis”, *Energy*, Volume 61, Pages 447-454, 2013.
- [5] Innovative Facade Design And Engineering BIPV Transparent Glass Solar Panel, <https://www.solar-pvmodule.com>
- [6] Sofia Carvalho Ganilha: “Potential of Bifacial PV Installation and Its Integration with Storage Solutions”, Universidade de Lisboa, 2017.
- [7] Caixia Zhang: “The Influence of the Installation Condition and Performance of Bifacial Solar Modules on Energy Yield”, 2023
- [8] Next2Sun GmbH, <https://www.next2sun.de/>
- [9] Жељко Ђуришић, Јован Микуловић, „Соларна енергетика”, Електротехнички факултет Београд, 2019.
- [10] Andre Mermoud, „PVsyst User’s Manual”, 2014.

БИОГРАФИЈЕ



Милена Лекић је рођена у Београду 1994. године. Завршила је основне и мастер студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на смеру Енергетика, електроенергетске мреже и системи.

Њено радно искуство укључује рад у пољу електромоторних погона, нисконапонских инсталација, паметних кућа, осветљења, а у последњих неколико година фокусира се на развој у области пројектовања трансформаторских станица са нагласком на системима секундарне и терцијарне опреме. Њена посебна поља интересовања су обновљиви извори енергије и развој техничких система који би омогућили њихову лакшу интеграцију у електроенергетски систем, као што су дигитализација, напредни системи заштите и управљања електроенергетских мрежа, cyber безбедност, као и пропратни актуелни друштвени феномени који оваквим развојима управљају.



Жељко Р. Ђуришић је рођен 1972. године у селу Бабино, Беране, Црна Гора. Дипломске, магистарске и докторске студије је завршио на Електротехничком факултету у Београду, на смеру Електроенергетски системи (ЕЕС),

где је запослен у звању редовни професор. Од 2009. године ради као гостујући професор на Електротехничком факултету Универзитета у Источно Сарајеву, где предаје предмете из области

квалитета електричне енергије и интеграције ОИЕ у ЕЕС. Коаутор је четири уџбеника, три монографије међународног значаја и једног поглавља у књизи међународног значаја. Аутор/коаутор је преко 250 научних/стручних радова, од којих је преко 30 објављено у међународним часописима са SCI листе. Члан је борда едитора међународног научног часописа *Wind*. Члан је уређивачког Одбора домаћег стручног часописа „Енергија”. Члан је студијског Комитета Ц4 – Техничке перформансе ЕЕС у оквиру CIGRE Србија. Члан је Студијског комитета Ц2 – Квалитет електричне енергије и електромагнетска компатибилност у оквиру CIGRE Србија. Председник је Студијског комитета Ц4 у оквиру CIGRE Црна Гора. Члан је програмског одбора међународних конференција INDEL и INFOTECH. Члан је научно-програмског одбора домаће конференције Енергетика.



Милорад Куч је рођен у Беранаме 1997. године. Основне и мастер академске студије завршио је на Електронском факултету Универзитета у Нишу. Области његовог интересовања јесу обновљиви извори енергије,

микромреже, системи складиштења енергије и њихова употреба и усавршавање. Бави се и пројектовањем трансформаторских станица, примарном и секундарном опремом и редовно прати достигнућа и иновације на пољу електроенергетике учествујући на различитим конференцијама као што су CIGRE и CIGRE.

Milena Lekić¹, Milorad Kuč¹, Željko Đurišić²

Comparative Analysis of Operational Characteristics and Effects of Using Bifacial Vertically Mounted and Monofacial South-Oriented Photovoltaic Panels - A Case Study on the Pešter Plateau

¹ WSP, Belgrade, Serbia*² University of Belgrade – Faculty of Electrical Engineering, Belgrade, Serbia

Original scientific research article

Highlights

- Advantages of bifacial vertically mounted photovoltaic panels compared to monofacial south-facing ones, considered in relation to the compatibility of their power generation with the daily and annual consumption diagrams and electricity market prices
- Observing the advantages of the combined systems of these two types of photovoltaic power plants due to the almost constant output power during the day and for the maximum use of the existing capacities of transmission systems
- Using vertically placed photovoltaic panels and keeping the agricultural potential of the soil

Abstract

Bifacial vertically mounted solar panels represent a technical solution that converts solar energy into electricity in such a way that certain shortcomings of conventional monofacial, south-facing solar panels, primarily in terms of daily and annual production diagrams can be overcome. In this paper, the generation from a monofacial, south-oriented photovoltaic power plant and a bifacial photovoltaic power plant with surfaces oriented in the east-west direction have been analyzed, with a reference to the north-south orientation as well. Also, their correlation with the consumption diagram and the electricity price diagram on the market has been analyzed. The analysis included the impact of snowfall, temperature and soiling of the module. The effect of land occupation and the possibility of using it for agricultural purposes will also be considered. The analyses were performed assuming an installation at a real location on the Pešter Plateau, and the calculations were performed using real insolation data and real parameters of photovoltaic modules.

Keywords

Bifacial photovoltaic modules, Monofacial photovoltaic modules, Vertical photovoltaic panels

Note:

This article represents an expanded, improved and additionally peer-reviewed version of the paper "Comparative Analysis of Photovoltaic Power Plants with Monofacial South-Oriented and Bifacial Vertical PV Panels on the Pešter Plateau", awarded by Expert Committee EC-C6 Distribution Systems and Distributed Generation at the 36th CIGRE Serbia Conference, Zlatibor, May 22-26, 2023

Received: August 1st, 2024 Reviewed: August 26th, 2024
 Modified: August 28th, 2024 Accepted: September 5th, 2024
 *Corresponding author: Milena Lekić, +381 61 279 40 06
 E - mail: milena.lekic@gmail.com
 New affiliation: Mott MacDonald

