

# Оптимална оријентација двоводних кровова прекривених фотонапонским панелима – студија случаја Крагујевац

ДАВОР Н. ЈОВАНОВИЋ, Универзитет у Крагујевцу,

Факултет инжењерских наука, Крагујевац

АЛЕКСАНДАР М. НЕШОВИЋ, Универзитет у Крагујевцу,

Факултет инжењерских наука, Крагујевац

Прегледни рад

UDC: 621.383.51:514.742.4

DOI: 10.5937/tehnika2303319J

*У овом раду спроведена је студија одређивања оптималне оријентације двоводних кровова прекривених фотонапонским панелима (ФНП) за подручје града Крагујевца.*

*Нумеричке симулације преко Google SketchUp и EnergyPlus софтвера изводе се за два различита случаја постављања ФНП. Први случај анализира уградњу ФНП само на једну страну двоводног крова. Други случај анализира уградњу ФНП на обе стране двоводног крова. Временски услови за град Крагујевац узети су у обзир приликом спровођења симулација.*

*У случају једностраног прекривања двоводног крова, годишња производња електричне енергије највећа је када су ФНП окренути ка југу ( $223,26 \text{ kWh/m}^2/\text{god}$ ). У случају обостраног (двостраног) прекривања, годишња производња електричне енергије може бити до  $181,3 \text{ kWh/m}^2/\text{god}$ , ако је двоводни кров оријентисан у правцу исток-запад. Поређењем оба случаја, јужно оријентисани ФНП из првог случаја годишње генеришу  $18,79\%$  више електричне енергије од источно-западно оријентисаних ФНП из другог случаја.*

**Кључне речи:** соларни упадни угао, двоводни кров, фотонапонски панел, оптимална оријентација, Google SketchUp, EnergyPlus

## 1. УВОД

У централној Србији, годишња ирадијација соларног зрачења на отвореном терену креће се између  $1250 \text{ kWh/m}^2$  (на северу) и  $1450 \text{ kWh/m}^2$  (на југу), што је за  $154\text{--}354 \text{ kWh/m}^2$  више од европског просека ( $1096 \text{ kWh/m}^2$ ). Овај показатељ говори да је соларни потенцијал у централној Србији недовољно искоришћен, односно, да постоји велики простор за додатно инсталирање соларних система, првенствено фотонапонских панела (ФНП) [1-3].

Многи су фактори који утичу на перформансе ФНП, међу којима је и њихова оријентација.

У прегледном раду доступном у [4], дате су препоруке за одређивање оптималних углова нагиба соларних (уређаја) система широм света, укључујући и Србију. Теоријски модел соларног упад-

ног угла за произвољно оријентисану фиксну (и равну) површину може се наћи у [5].

У [6] је извршена процена оптималне оријентације ФНП за 1.020 локација у Остину. Студија је показала да је при азимутним угловима  $187\text{--}188^\circ$  генерисање електричне енергије највеће.

У [7] су одређене оптималне дубине хоризонтално постављених надстрешница на свим странама стамбене куће (први случај), на источној и западној (други случај), односно на северној и јужној страни (трећи случај). Оптимизација је спроведена у програму EnergyPlus, уз коришћење оптимизационог алгоритма Hooke Jeeves.

Полазећи од реално измерених вредности екстратерестријалног соларног зрачења, у [8] је представљен модел за одређивање оптималних углова (нагибних и азимутних) постављања ФНП. Овај модел развио је Микулић са својим тимом, а прикупљање временских података било је са десетоминутним кораком.

Трошкови инсталирања ФНП у зависности од њихове оријентације на територији Тексаса испитани су у [9]. Поједностављен модел за процену

Адреса аутора: Давор Јовановић, Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, Сестре Јањић 6

e-mail: davor.jovanovic@uni.kg.ac.rs

Рад примљен: 10.04.2023.

Рад прихваћен: 13.06.2023.

оптимальне оријентације кровова са ФНП за три града у Јужној Кореји разрађен је у [10].

Vogdanska и Chwieduk [11] дали су препоруке за оптимальну оријентацију грађевинских елемената у циљу максимизирања прикупљања долазног соларног зрачења за 59 градова у Пољској.

Оптимальна оријентација ФНП одређена је и за 18 градова у Саудијској Арабији [12].

Излазна енергија система коришћена је као главни показатељ функционисања ФНП у студији представљеној у [13].

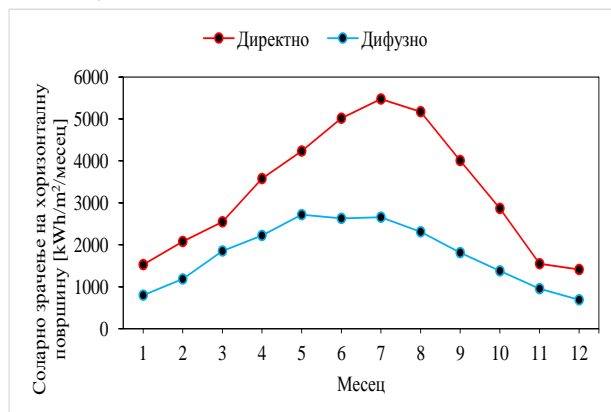
У овом раду испитује се производња електричне енергије из ФНП једнострано (први случај) и двострано (други случај) постављених на двоводни кров зграде која се налази на територији града Крагујевца (географска ширина  $44,02^\circ$  и географска дужина  $20,92^\circ$ ). Нумеричко истраживање, уз коришћење софтвера Google SketchUp и EnergyPlus, спроведено је за различите оријентације двоводног крова. Оптимальне оријентације двоводног крова за жељену локацију одређене су у оба случаја, и могу се убудуће користити у стручној пракси.

## 2. МАТЕРИЈАЛИ И МЕТОДЕ

Оба случаја нумерички су симулирана у софтверима Google SketchUp и EnergyPlus, који се користе за одређивање енергетског понашања зграда било којих намена.

Соларно зрачење, као и други временски услови, за град Крагујевац, унапред је одређено преко одговарајуће временске датотеке [14-16].

Просечно месечно директно и дифузно соларно зрачење које пристиже на хоризонталну површину (из поменуте датотеке) графички је представљено на слици 1.

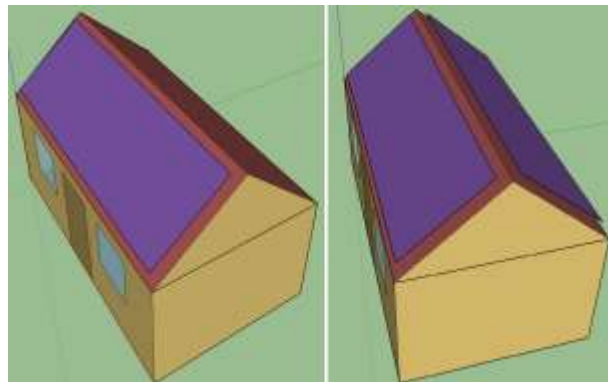


Слика 1 – Просечно месечно директно и дифузно соларно зрачење на хоризонталну површину за град Крагујевац

Треба напоменути да се, при одређивању годишње производње електричне енергије из ФНП, у

обзир узимају унутрашња и спољња рефлексија, за оба анализирана случаја, за све оријентације двоводног крова.

Изометрија анализираних зграда са двоводним кровом приказана је на слици 2.



Слика 2 – Изометријски приказ анализираних зграда са једнострано (лево) и двострано (десно) постављеним ФНП на двоводном крову

Производња електричне енергије из ФНП, математички се може одредити на следећи начин Јед. (1):

$$P_{generation} = A_{surface} f_{active} I_{TOT} \eta_{cell} \eta_{inverter} \quad (1)$$

где су [16]:  $P_{generation}$  [кWh] електрична енергија произведена из ФНП,  $A_{surface}$  [м<sup>2</sup>] укупна површина ФНП,  $f_{active}$  [-] део површине са активним соларним ћелијама,  $I_{TOT}$  [кWh/м<sup>2</sup>] укупна количина соларне енергије која доспева на површину ФНП,  $\eta_{cell}$  [-] ефикасност соларних ћелија у склопу ФНП и  $\eta_{inverter}$  [-] ефикасност инвертера.

## 3. СЦЕНАРИО СИМУЛАЦИЈА

Техничке карактеристике коришћених ФНП приказане су у табели 1.

Табела 1. Техничке карактеристике модула EXM 300/156-60 [17]

Параметар	Ознака	Вредност
Излазна снага	[W]	300
Напон	[V]	32,1
Ампеража	[A]	9,41
Површина једног ФНП	[m <sup>2</sup> ]	1,625

У табели 2 приказани су разрађени симулациони сценарији једностраног (први случај) и двостраног (други случај) постављања ФНП за двоводни кров (слика 2).

Имати на уму да су оријентације ФНП анализираних у осам различитих праваца (први случај):

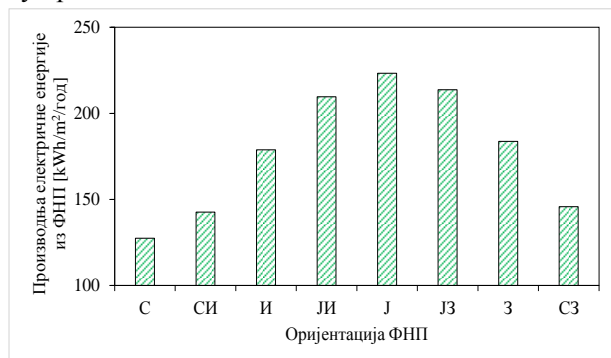
север, североисток, исток, југоисток, југ, југозапад, запад и северозапад. У другом случају анализирана су следећа четири правца: север, североисток, исток, југоисток.

Табела 2. Симулациони сценарио

Параметар	Вредност	
Случај	1	2
Број кровних страна прекривених ФНП	Једна	Две
Нагиб крова према хоризонталу [°]	45	
Површина крова прекривена ФНП [m <sup>2</sup> ]	13,97	27,94
Површина ФНП са активним ћелијама [%]	100	100
Ефикасност соларних ћелија у склопу ФНП [%]	18,25	18,35
Ефикасност инвертера [%]	90	90

#### 4. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

Након спроведених симулација у софтверу EnergyPlus, за оба случаја, резултати за први случај су приказани на слици 3.



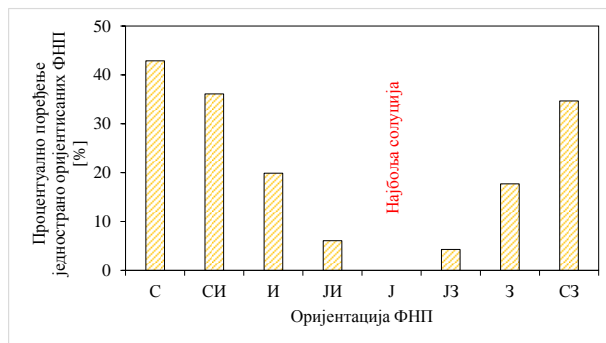
Слика 3 – Годишња производња електричне енергије у случају једностраног постављања ФНП за различите случајеве оријентације двоводног крова

Према вредностима приказаним на слици 3, јужни правац је оптималан за постављање ФНП, јер се у том случају генерише највећа количина електричне енергије (223,26 kWh/m<sup>2</sup>/год).

Са друге стране, постављање ФНП на кров оријентисан ка северу је опција коју треба избегавати (127,49 kWh/m<sup>2</sup>/год).

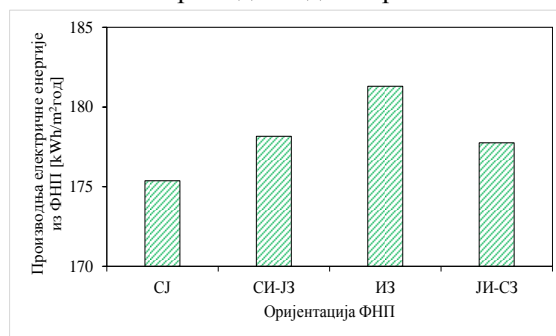
Резултати са слици 3 могу се међусобно и процентуално упоредити, рецимо, у односу на најбољу, тј. јужну солуцију (слика 4).

Југозападно и југоисточно једнострано оријентисани ФНП показали су најмања одступања у односу на јужну једнострану оријентацију (слика 4). Први за 4,29%, други за 6,07%. На трећем месту је западна једнострана оријентација (17,7%).



Слика 4 – Процентуално поређење јужно оријентисаног једностраног ФНП са преосталим варијантама једностране оријентације ФНП

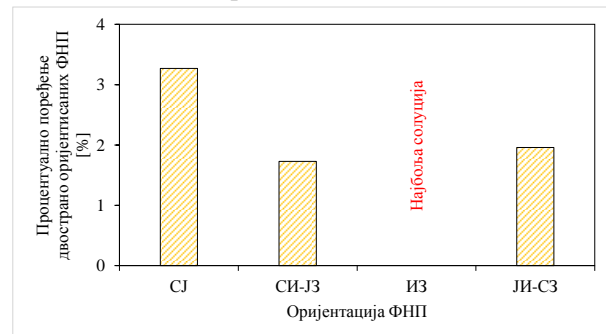
На слици 5 приказана је производња електричне енергије из ФНП у случају њиховог постављања на обе стране двоводног крова.



Слика 5 – Годишња производња електричне енергије у случају двостраног постављања ФНП за различите случајеве оријентације двоводног крова

У случају двостраног постављања ФНП, најбоље је да двоводни кров буде окренут у правцу исток-запад (181,3 kWh/m<sup>2</sup>/год). Оријентација север-југ је за 3,27% лошија од претходно поменуте (слика 6).

У односу на ИЗ, производња електричне енергије у случају СИ-ЈЗ и ЈИ-СЗ мања је за 1,73%, односно за 1,96%, респективно (слика 6).



Слика 6 – Процентуално поређење исток-запад оријентисаног двостраног ФНП са преосталим варијантама двостране оријентације ФНП

Генерално гледано, у случају двостраног постављања ФНП, оријентација зграде нема великог утицаја на годишњу производњу електричне енергије (максимално међусобно одступање износи мање од 4%). Овај податак је од посебне важности за урбане средине, где је оријентација зграде условљена урбанистичким плановима.

Поређењем оба анализирана случаја, може се закључити да је најбоља солација из другог случаја (оријентација у правцу исток-запад) за 18,79% (или приближно 42 kWh/m<sup>2</sup>/god) лошија од најбоље солације из првог случаја (јужна оријентација).

Са друге стране, север-југ оријентација ФНП из другог случаја омогућава 37,56% већу производњу електричне енергије од северне (једностране) оријентације ФНП у првом случају.

Дакле, анализом оба случаја, може се закључити да је производња електричне енергије најмања (мања од 150 kWh/m<sup>2</sup>/god) у случају С, СИ и СЗ једностране оријентације ФНП.

## 5. ЗАКЉУЧАК

Различите оријентације једнострано (први случај) и двострано (други случај) постављених ФНП на двоводном крову, симулиране су у софтверима Google SketchUp и EnergyPlus, за град Крагујевац (централна Србија). Временски услови (првенствено се мисли на директно и дифузно соларно зрачење) за град Крагујевац имплементирани су у софтвер за симулацију.

Резултати истраживања у првој фази показали су да јужна оријентација представља оптималну оријентацију двоводног крова са годишњом производњом електричне енергије у износу од 223,26 kWh/m<sup>2</sup>/god.

У другом случају, исток-запад оријентација је најбоља, са годишњом производњом електричне енергије у износу од 181,3 kWh/m<sup>2</sup>/god.

Када се упореде оба случаја, јужно оријентисани ФНП у првом случају имају 18,79% већу годишњу производњу електричне енергије од источно-западно оријентисаних ФНП у другом случају.

Са друге стране, други случај нуди већу „флексибилност“ у просторном, грађевинском, архитектонском и урбанистичком смислу. Другим речима, производња електричне енергије из ФНП „отпорнија“ је на негативне ефекте поменутих појава које су реалне у пракси.

Најмања производња електричне енергије (мања од 150 kWh/m<sup>2</sup>/god) забележена је у првом случају, када је двоводни кров са једнострано постављеним ФНП оријентисан ка северу, северозападу и северозападу.

## 6. ЗАХВАЛНИЦА

Овај рад представља резултате истраживања насталих у оквиру пројекта Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије број ТР 33015.

Захваљујемо се Министарству просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије на финансијској подршци током овог истраживања.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лукић Н, Бабић М, *Соларна енергија*, монографија, Машински факултет Унивезитета у Крагујевцу, Крагујевац Србија, 2008.
- [2] Pavlović T. et al. Possibility of electricity generation using PV solar plants in Serbia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 20, No. -, pp. 201-218, 2013.
- [3] Djurdjevic D. Z, Perspectives and assessments of solar PV power engineering in the Republic of Serbia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 5, pp. 2431-2446, 2011.
- [4] Hafez A. Z. et al. Tilt and azimuth angles in solar energy applications – A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 77, No. -, pp. 147-168, 2017.
- [5] Nešović A. M, Theoretical model of solar incident angle for an optionally oriented fixed flat surface, *Tehnika*, Vol. 77, No. 3, pp. 328-333, 2022.
- [6] Rhodes, J. D., et al., A multi-objective assessment of the effect of solar PV array orientation and tilt on energy production and system economics, *Solar Energy*, Vol. 108, No. -, pp. 28-40, 2014.
- [7] Cvetković D, Nešović A, Optimization of the geometry of horizontal roof overhangs covered with photovoltaic panels, In Proc. *4th International Conference on Renewable Electrical Power Sources, ICREPS 2016*, Belgrade, Serbia, pp. 255-263, 17-18 October 2016.
- [8] Mikulović J. et al. Determination of optimal tilt angles of photovoltaic panels, In Proc. *12th International Scientific and Professional Symposium Infoteh-Jahorina, INFOTEH 2013*, Jahorina, Republic of Srpska (Bosnia and Herzegovina), pp. 243-248, 20-22 March 2013.
- [9] Deetjen T. A. et al. Solar PV integration cost variation due to array orientation and geographic location in the Electric Reliability Council of Texas, *Applied Energy*, Vol. 180, No. -, pp. 607-616, 2016.

- [10] Ban C. et al, A simplified estimation model for determining the optimal rooftop photovoltaic system for gable roofs, *Energy and Buildings*, Vol. 151, No. -, pp. 320-331, 2017.
- [11] Chwieduk, D, Bogdanska B, Some recommendations for inclinations and orientations of building elements under solar radiation in Polish conditions, *Renewable Energy*, Vol. 29, No. 9, pp. 1569-1581, 2004.
- [12] Al Garni H. Z. et al, Optimal orientation angles for maximizing energy yield for solar PV in Saudi Arabia, *Renewable Energy*, Vol. 133, No. -, pp. 538-550, 2019.
- [13] Haghdadi N. et al, A method to estimate the location and orientation of distributed photovoltaic systems from their generation output data, *Renewable Energy*, Vol. 108, No. -, pp. 390-400, 2017.
- [14] \*\*\* *Sketchup Resources*, <https://sites.google.com/site/sketchupsage/resources#TOC-Educational-Resources>.
- [15] Brackney L. et al, *Building energy modeling with openStudio: A practical guide for students and professionals*, 2018.
- [16] \*\*\* *Engineering reference*, [https://energyplus.net/assets/nrel\\_custom/pdfs/pdfs\\_v22.1.0/EngineeringReference.pdf](https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v22.1.0/EngineeringReference.pdf).
- [17] \*\*\* *X-Line Mono High Efficiency*, <https://www.solar-shop.rs/wp-content/uploads/2018/02/EXE-300W-Mono.pdf>.

## SUMMARY

### OPTIMAL ORIENTATION OF THE GABLE ROOFS COVERED WITH PHOTOVOLTAIC PANELS – CASE STUDY KRAGUJEVAC

*In this paper, a study was conducted to determine the optimal orientation of the gable roofs covered with photovoltaic panels (PVP) for the area of the city of Kragujevac.*

*Numerical simulations using Google SketchUp and EnergyPlus software are performed for two different PVP placement cases. The first case analyzes the installation of PVP only on one side of the gable roof. The second case analyzes the installation of PVP on both sides of the gable roof. The weather conditions for the city of Kragujevac were taken into account during the simulations.*

*In the case of one-sided gable roof covering, the annual electricity production is the highest when the PVPs are facing south (223.26 kWh/m<sup>2</sup>/a). In the case of bilateral (two-sided) covering, the annual electricity production can be up to 181.3 kWh/m<sup>2</sup>/a, if the gable roof is oriented in the east-west direction. By comparing both cases, south-oriented PVPs from the first case annually generate 18.79% more electricity than east-west-oriented PVPs from the second case.*

**Key Words:** *Solar incident angle; Gable roof, Photovoltaic panel, Optimal orientation; Google SketchUp; EnergyPlus.*