

# Vertikalne fasade solitera kao lokacije za instalaciju fotonaponskih panela

## Vertical Facades of the High-Rise Buildings as Locations for the Photovoltaic Panels Installation

Andreja Stefanović

Datasmart, Kragujevac

**Rezime** - Fasade solitera predstavljaju alternativnu lokaciju za instalaciju fotonaponskih panela, koji se najčešće postavljaju na krovove objekata. Specifičan prostorni oblik solitera, sa relativno malom površinom osnove u odnosu na visinu objekata, pruža mogućnost iskorišćenja vertikalnih fasada ovih objekata, koje su često u lošem stanju. Fotonaponski paneli postavljeni na ovakvim lokacijama, osim generisanja električne energije, mogu imati estetski i urbanistički uticaj na gradski prostor. U ovom radu je izvršena simulacija generacije električne energije iz fotonaponskih panela, lociranih na vertikalnim fasadama solitera grada Kragujevca, korišćenjem softvera EnergyPlus. Sprovedena je analiza dobijenih rezultata za realne prostorne orijentacije fasada, pri čemu je modelirano i okruženje solitera koje stvara osenčenje fasada, kao što su okolni objekti i visoko drveće. Dobijene godišnje vrednosti generisane električne energije su upoređene sa energijom koje se troši za grejanje ovih građevinskih objekata.

**Ključne reči** - soliter, fotonaponski paneli, simulacija, EnergyPlus

**Abstract** - Vertical high-rise buildings facades are an alternative location for the installation of photovoltaic panels, which are most often placed on the roofs of buildings. The specific spatial shape of the high-rise building, with a relatively small surface area in relation to the height of the building, enables usage of the building vertical facades, which are often in poor condition. Photovoltaic panels installed in such locations, in addition to generating electricity, can have an aesthetic and urban impact on the city space. In this paper, a simulation of electricity generation from photovoltaic panels located on the vertical facades of high-rise buildings in the city of Kragujevac was performed using the EnergyPlus software. The analysis of the obtained results for the real spatial orientations of the facades was conducted, with modelled surroundings that create the shading of the facades, such as the buildings and tall trees. The obtained annual values of generated electricity were compared to the energy consumed for building heating.

**Index Terms** - high-rise building, photovoltaic panels, simulation, EnergyPlus

### I UVOD

Za građevinski fond se vezuje potrošnja od više od 30% ukupne svetske finalne energije, od čega se 74% troši u stambenim zgradama i 26% u nestambenim zgradama [1]. Sa druge strane, danas 50% ljudi živi u urbanom okruženju i smatra se da će do 2100. godine stanovništvo u urbanim područjima predstavljati 80% ukupne svetske populacije [2]. Pretpostavlja se da je trenutno u urbanom okruženju prosečna godišnja potrošnja električne energije po stanovniku 3,1 MWh [3].

Kontinuirani rast svetske populacije i stalna migracija ljudi iz ruralnih područja u velike gradove uveliko su povećali potražnju za električnom energijom u urbanim sredinama. Ova potrošnja je do danas uglavnom bila omogućena sagorevanjem neobnovljivih fosilnih goriva u elektranama, koje negativno utiče na održivi razvoj i životnu sredinu. Očigledna je potreba za prelaskom na sistem proizvodnje električne energije koji ne zagađuje životnu sredinu i koji je iz obnovljivih izvora. U tom smislu, solarni fotonaponski paneli, koji koriste obnovljivu energiju Sunca i tokom rada ne emituju gasove sa efektom staklene bašte, predstavljaju važan doprinos rešenju energetskeg problema u urbanim sredinama. Urbani prostor gradova sadrži velike površine zgrada koje mogu biti iskorišćene za postavljanje ovih sistema.

### II OPRAVDANOST FASADA ZGRADA KAO LOKACIJA ZA INSTALACIJU FOTONAPONSKIH SISTEMA

Najčešća lokacija za postavljanje fotonaponskih sistema su krovovi, pri čemu se fasade obično zanemaruju zbog njihovog neoptimalnog ugla nagiba panela. Ipak, krovne površine često ne mogu biti dovoljne da obezbede potrebnu obnovljivu energiju potrebnu zgradi, a i sve više se koriste za postavljanje zelenih površina, koje smanjuju uticaj urbanog toplotnog ostrva, poboljšavaju upravljanje atmosferskim vodama i povećavaju urbani biodiverzitet. Zgrade imaju različite arhitektonske i energetske zahteve, što može dovesti do korišćenja relevantnog dela njihove krovne površine za druge funkcije i strukture i/ili opremu, kao što su sistemi za klimatizaciju i komunikacije. Kada analiziramo urbanistički izgled grada, primećujemo da zgrade postaju generalno više visoke nego široke. Očekuje se da će se ovaj trend vertikalnog urbanizma zadržati i u budućnosti, i zato će površina vertikalnih fasada u budućim gradovima znatno

premašiti površinu krovova, predstavljajući važan deo površine zgrada koju treba uzeti u obzir kada se bavimo solarnim potencijalom grada.

Fasade postaju predmet sve većeg interesovanja arhitekata i urbanista koji žele da stvore inovativne i privlačne objekte, koji su u isto vreme i efikasni generatori električne energije. Dok su rani fotonaponski sistemi bili korišćeni samo kao uređaji za generisanje električne energije, bez posebnih estetskih razmatranja, današnja tehnologija je dovela fotonaponske panele na nivo na kome ovi sistemi postaju deo omotača zgrade. Bez obzira da li se fotonaponski paneli montiraju na postojeće zgrade ili su integrisani kao funkcionalni arhitektonski elementi, korišćenje tipično tamnoplavih i pravougaonih panela, ali i alternativnih boja panela, tekstura, oblika i nivoa transparentnosti može omogućiti izazovnije estetske urbanističke zahteve.

Visoke zgrade ili soliteri zauzimaju posebno mesto u istraživanju vertikalnih fasada kao lokacija za instalaciju fotonaponskih panela i to iz dva osnovna razloga. Prvi razlog su velike površine vertikalnih fasada koje povećavaju mogućnosti korišćenja solarne obnovljive energije. Drugi razlog je što su zbog svoje visine i izdvajanja iz urbanističkog okruženja fasade solitera direktnije izložene sunčevom zračenju u odnosu na fasade ostalih zgrada, a što je glavna mana njihove primene. Soliteri i energija su najčešće u naučnim radovima proučavani u istraživanjima mera energetske efikasnosti za smanjenje potrošnje energije [2, 4], optimizacije potrošnje energije [5] i uticaja različitih parametara na potrošnju energije, kao što su prirodna ventilacija [6], ponašanje stanara [7] i raspored i energetska interakcija individualnih stambenih jedinica [8-9]. Solarni potencijal solitera je takođe istraživani, u opštijem obliku [10-11] ili u temama korišćenja fotonaponskih panela na fasadama solitera komercijalne i stambene namene [12-14].

### III SOLARNI POTENCIJAL FASADA ZGRADA

Procena potencijala solarne energije na površinama zgrada u urbanom okruženju je osnovni preduslov za investiciju u fotonaponske sisteme. Procena solarnog potencijala fasada postojećeg građevinskog fonda može biti veliki izazov iz različitih razloga [15]:

- neoptimalni nagib i prisustvo senki zbog zgrada u okruženju,
- prisustvo senki zbog vegetacije i drveća, i
- prisustvo dodatnih arhitektonskih elemenata.

Osnovne mane vertikalnih fasada kao lokacije za fotonaponske panele su da dobijaju manje sunčevog zračenja, posebno u letnjim mesecima, pošto je ugao upada sunčevog zračenja daleko od optimalnog i da na njih više utiče kompaktnost urbanog rasporeda zgrada.

Sa druge strane, maksimalna energija koju proizvode solarni paneli na svakoj vertikalnoj fasadi zgrade se dostiže u različito doba dana, tako da se proizvodnja energije raspoređuje ravnomernije tokom dana, pošto će zgrada obično imati četiri, ili najmanje dve fasade okrenute ka suprotnim stranama sveta. Tako solarni doprinos fasada zgrada koje su orijentisane bliže pravcu istok-zapad može biti značajan za pokrivanje povećanja potrošnje električne energije u jutarnjim i popodnevnim satima

kada je Sunce niže na nebu. Pored toga, vertikalne fotonaponske fasade će proizvoditi relativno više energije zimi nego u letnjim mesecima, takođe usled položaja Sunca na nebu. Ovo može biti veoma značajno pošto će po isteku državnih podsticajnih mera za integraciju obnovljivih izvora energije, isplativost investiranja u solarne elektrane zavistiti dominantno od usklađenosti dijagrama proizvodnje i promenljivih cena energije na slobodnom tržištu električne energije [16]. Paneli ugrađeni u vertikalne fasade mogu imati i značajan uticaj na poboljšanje energetskih performansi omotača zgrade.

Zahvaljujući velikom poboljšanju računarske snage i tehnikama modeliranja, solarni potencijal u gradskom okruženju danas se može proceniti na makro skali, pomoću alata koji su u stanju da manipulišu velikim količinama georeferenciranih podataka. Najčešće tehnike za identifikaciju odgovarajućih oblasti sa povoljnim solarnim potencijalom na krovovima i fasadama su one koje koriste detaljne 3D modele, kao što su LiDAR (Light Detection And Ranging) [17-19] i GIS (Geographic information systems) [15, 20-21].

U ovom radu je izvršena direktna procena solarnog potencijala simulacijom generisane električne energije u programu EnergyPlus na mikro nivou solitera, u njihovom najbližem okruženju. Ovo je bilo moguće pošto postoji samo šest različitih arhitektonskih tipova solitera, jer je spoljašnjost određenog broja solitera međusobno identična. Ova činjenica je značajno smanjila vreme utrošeno za modeliranje i simulaciju svakog posmatranog solitera, a što bi u slučaju velikog broja različitih zgrada bilo neracionalno.

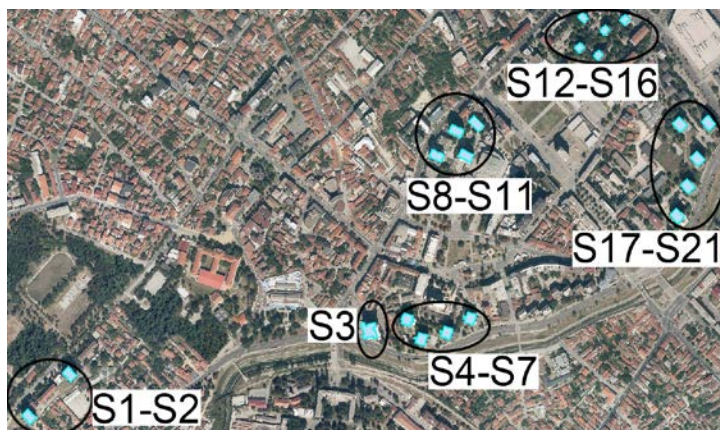
### IV PREDMET PROUČAVANJA

Istraživanje obuhvata procenu solarnog potencijala simulacijom generisane električne energije iz fotonaponskih panela postavljenih na vertikalne fasade solitera u gradu Kragujevcu u Srbiji. Korišćena je definicija solitera kao slobodno stojećeg objekta velike spratnosti – više od deset spratova, na zasebnoj parceli, koji se ne graniči sa susednim objektima ni sa jedne strane [22]. Ovakvih visokih zgrada u Srbiji nema mnogo; i one su karakteristika perioda izgradnje od druge polovine šezdesetih, pa do kraja osamdesetih godina.

Period 1946-1960. godine je period kada počinju da se grade soliteri i oni čine 1% ukupno izgrađenih objekata u ovom periodu. U periodu 1961-1970. godine soliteri su zastupljeni sa 5%, dok su u periodu 1971-1980. godine bili zastupljeni sa 11%. U periodu izgradnje 1981-1990. godine zabeležen je pad u izgradnji solitera sa svega 3% zastupljenosti, dok u periodu 1991-2012. godine soliteri nisu građeni [22]. Ova promena je uslovljena izmenom opredeljenja daljeg urbanističkog razvoja gradova i ograničavanja ukupne visine novih objekata, kao i ekonomskom moći investitora. Ovakav trend održao se sve do pred sam kraj perioda, kada, pod pritiskom uslova savremenog tržišta, dolazi do ponovnog otvaranja mogućnosti planiranja i građenja visokih objekata, naročito u Beogradu.

Predmet istraživanja je dvadeset jedan soliter u jezgru grada Kragujevca. Pošto je u periodima izgradnje obično građeno više solitera sa identičnim spoljašnjim omotačem na određenim lokacijama, proučavani soliteri su podeljeni u šest grupa u kojima se nalaze soliteri sa identičnim spoljašnjim dimenzijama i

rasporedom prozora na spoljašnjim zidovima (Slika 1).



**Slika 1.** Grupisani soliteri u jezgru grada Kragujevca

Oznaka grupe solitera, broj solitera u grupi, period izgradnje, kao i površina osnove i broj spratova pojedinačnog solitera u grupi, predstavljani su Tabeli 1.

**Tabela 1.** Osnovne karakteristike formiranih grupa solitera

Oznaka grupe	Broj solitera u grupi	Period izgradnje	Površina osnove pojedinačnog solitera (m <sup>2</sup> )	Broj spratova pojedinačnog solitera
S1-S2	2	1975	407	16
S3	1	1966	691	15
S4-S7	4	1968-1976	407	14
S8-S11	4	1963-1966	412	15
S12-S16	5	1962-1964	207	11
S17-S21	4	1972-1974	429	14

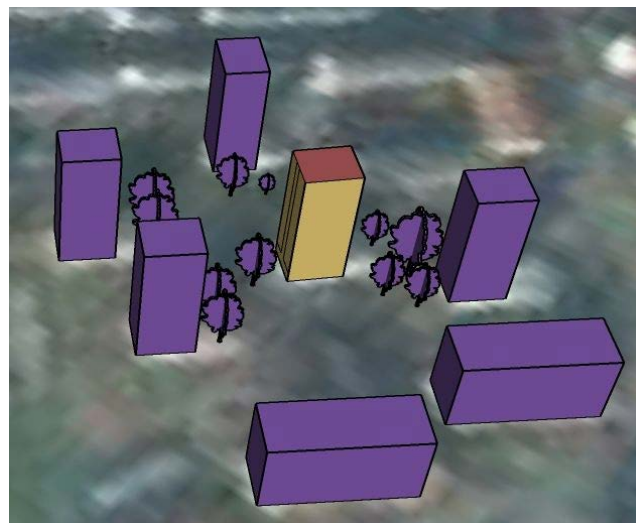
#### V MODELIRANJE SOLITERA I NJIHOVOG OKRUŽENJA

Za modeliranje solitera i njihovog okruženja korišćen je program Sketchup (zajedno sa plug-in programom Legacy OpenStudio) i koji predstavlja grafički editor za fajlove koji su ulazni podaci za simulacije u programu EnergyPlus. U programu Sketchup ucrtana je geometrija zgrada i izvršeno je pozicioniranje zgrade u prostornom okruženju.

Do podataka neophodnih za modeliranje solitera i njihovog okruženja došlo se na dva načina: korišćenjem dostupnih digitalnih podataka (3d modeli i poligoni osnova solitera i zgrada) i prikupljanjem podataka na terenu (raspored prozora na omotaču objekata i lokacija i visina drveća).

Soliteri su predstavljeni njihovim konstrukcionim omotačem, uz isticanje površina na fasadama koje su pogodne za instalaciju fotonaponskih panela. Pozicioniranje solitera u prostornom okruženju je izvršeno tako što je soliter postavljen na svoju realnu poziciju u prostoru na mapi učitanoj iz web servisa Google Maps. Na istoj mapi, u realnoj veličini, ucrtane su i okolne zgrade i drveće, kao objekti koji generišu senke na modelima solitera (Slika 2). Objekti koji se nalaze na severnoj

strani sveta u odnosu na solitere nisu modelirani pošto oni na njima ne stvaraju senku.



**Slika 2.** Modeliran soliter i njegovo okruženje u programu Sketchup

#### VI SIMULACIJA GENERISANE ELEKTRIČNE ENERGIJE IZ FOTONAPONSKIH SISTEMA INSTALISANIH NA VERTIKALNIM FASADAMA SOLITERA

Simulacija proizvedene električne energije iz fotonaponskih panela izvršena je u softveru EnergyPlus. Ovaj program je opsežno potvrđen [23, 24] i pokazao se kao jedan od najpodobnijih simulacionih alata u istraživanju koje su sprovela grupa autora [25], gde su upoređivane sposobnosti velikog broja simulacionih programa. Ovaj alat se koristi u širokom spektru istraživanja i u fazi je aktivnog razvoja, što znači da je svaka nova verzija programa funkcionalnija i poboljšana.

Spoljašnjost izučavanih solitera je takva da su dve suprotne fasade potpuno pokrivene prozorima, dok se ostale dve sastoje od po dve slobodne površine razdvojene jednom kolonom prozora. Ovo znači da su na svim soliterima osim na soliteru S3 fotonaponski paneli postavljeni na četiri površine od kojih se po dve nalaze na fasadama koje su na suprotnim stranama sveta (Slika 3).



**Slika 3.** Jugozapadno orijentisane fasade solitera S4-S7

Jedino je kod solitera S3 svaka od četiri površine, na koju se postavljaju fotonaponski paneli, orijentisana ka različitoj strani sveta (Slika 4). Pošto se paneli postavljaju direktno na spoljašnje

zidove solitera, to znači da je ugao nagiba panela iznosio 90°. Optimalan ugao nagiba panela je parametar sistema sa značajnim uticajem na generisanje električne energije i kao takav je tema opsežnih istraživanja [26-28]. U ovom radu on nije proučavan pošto bi efekat senki u fotonaponskim sistemima značajno uticao na složenost modeliranja i simulacije i smanjio korisnu površinu na fasadama za postavljanje panela. Broj panela je izabran tako da se maksimalno iskoriste površine fasada, uz vođenje računa o dodatnoj površini potrebnoj za izvođenje radova na instalaciji i održavanju sistema.



**Slika 4.** Jugoistočno i severoistočno orijentisane fasade solitera S3

Simulacija je sprovedena za period cele godine i koristi fajl klimatskih podataka za grad Kragujevac koji je dobijen korišćenjem programa Meteororm [29]. Fajl klimatskih podataka dobijen je interpolacijom podataka iz tri meteorološke stanice na rastojanjima 38 km (Ćuprija i Smederevska Palanka) i 40 km (Kraljevo) od grada Kragujevca. Vrednosti parametara za temperaturu izabrane su iz perioda 2000-2009. godine, dok su parametri za radijaciju izabrani iz perioda 1991-2010. godine.

Model fotonaponskog panela koji je korišćen u svim simulacijama je Kyocera KD325GX-LFB, sa karakteristikama prikazanim u Tabeli 2.

**Tabela 2.** Tehnički podaci za fotonaponski panel Kyocera KD325GX-LFB [30]

Nominalna izlazna snaga	325 W
Nominalni napon	40,3 V
Nominalna struja	8,07 A
Napon u otvorenom kolu	49,7 V
Struja kratkog spoja	8,69 A
Dužina panela	1662 mm
Širina panela	1320 mm
Visina panela	46 mm
Masa panela	27,5 kg
Broj ćelija po panelu	80
Maksimalni napon sistema jednosmerne struje	600 V

Opcija „Sandia“ je iskorišćena kao model za predviđanje proizvodnje električne energije iz fotonaponskih panela. Objekat „PhotovoltaicPerformance: Sandia“ u softveru EnergyPlus

opisuje performanse jednog tipa modula i zasnovan je na radu istraživača u laboratoriji “Sandia National Lab”, Albuquerque, United States. Veliki broj empirijskih koeficijenata potrebnih za upotrebu modela Sandia su dobijeni nakon opsežnih merenja i redukcije podataka [31].

## VII REZULTATI I DISKUSIJA

Rezultati dobijeni simulacijom generisane električne energije iz fotonaponskih sistema instalisanih na vertikalnim fasadama dvadeset jednog solitera u gradu Kragujevcu prikazani su u Tabelama 3-8.

U tabelama su prikazane orijentacije, površina panela, simulirana godišnja generisana električna energija i specifična godišnja simulirana generisana električna energija za četiri fasade svakog solitera na kojima su postavljani paneli. U tabelama su sumirani podaci koji se odnose na površinu panela i simuliranu godišnju generisanu električnu energiju po grupi solitera.

**Tabela 3.** Simulirana generisana električna energija za grupu solitera S1-S2

Oznaka	Strana sveta	Površina panela (m <sup>2</sup> )	Simulirana godišnja generisana električna energija (kWh/a)	Specifična godišnja simulirana generisana električna energija (kWh/m <sup>2</sup> a)
S1	J1	164,54	22.282,70	135,43
	J2	164,54	22.282,70	135,43
	SZ	164,54	12.811,31	77,86
	SZ	164,54	12.811,31	77,86
S2	J1	164,54	22.282,70	135,43
	J2	164,54	22.282,70	135,43
	SZ	164,54	12.803,57	77,82
	SZ	164,54	12.801,84	77,81
<b>UKUPNO</b>		<b>1.316,32</b>	<b>140.358,9</b>	

Najveći solarni potencijal u grupi solitera S1-S2 imaju četiri jugoistočne fasade na oba solitera i on iznosi 22.282,7 kWh/a, dok je najefikasnije iskorišćenje prostora na istim ovim fasadama i iznosi 135,43 kWh/m<sup>2</sup>a. Ukupni solarni potencijal ove grupe solitera iznosi 140.358,9 kWh/a (Tabela 3).

Najveći solarni potencijal na soliteru S3 ima južna fasada i on iznosi 39.962,22 kWh/a, dok je najefikasnije iskorišćenje prostora na istoj fasadi i iznosi 138 kWh/m<sup>2</sup>a. Ukupni solarni potencijal ove grupe solitera iznosi 118.161,94 kWh/a (Tabela 4).

**Tabela 4.** Simulirana generisana električna energija za soliter S3

Oznaka	Strana sveta	Površina panela (m <sup>2</sup> )	Simulirana godišnja generisana električna energija (kWh/a)	Specifična godišnja simulirana generisana električna energija (kWh/m <sup>2</sup> a)
S3	I	289,58	25.767,60	88,98
	J	289,58	39.962,22	138,00
	Z	289,58	35.061,39	121,08
	S	289,58	17.370,82	59,99
<b>UKUPNO</b>		<b>1.158,32</b>	<b>11.8161,94</b>	

Najveći solarni potencijal u grupi solitera S4-S7 ima jedna od jugozapadno orijentisanih fasada na soliteru S5 i on iznosi 29.207,22 kWh/a, dok je najefikasnije iskorišćenje prostora na istoj fasadi i iznosi 138,68 kWh/m<sup>2</sup>a. Ukupni solarni potencijal ove grupe solitera iznosi 315.487,8 kWh/a (Tabela 5).

**Tabela 5.** Simulirana generisana električna energija za grupu solitera S4–S7

Oznaka	Strana sveta	Površina panela (m <sup>2</sup> )	Simulirana godišnja generisana električna energija (kWh/a)	Specifična godišnja simulirana generisana električna energija (kWh/m <sup>2</sup> a)
S4	JZ	210,61	26.843,33	127,46
	JZ	210,61	25.962,41	123,28
	SI	210,61	12.697,96	60,29
	SI	210,61	12.713,20	60,37
S5	JZ	210,61	29.204,72	138,67
	JZ	210,61	29.207,22	138,68
	SI	210,61	10.938,84	51,94
	SI	210,61	10.806,00	51,31
S6	JZ	210,61	27.896,11	132,46
	JZ	210,61	28.540,56	135,52
	SI	210,61	11.242,28	53,38
	SI	210,61	11.454,73	54,39
S7	JZ	210,61	26.278,96	124,78
	JZ	210,61	27.615,07	131,12
	SI	210,61	11.780,06	55,93
	SI	210,61	12.305,92	58,43
<b>UKUPNO</b>		<b>3.369,76</b>	<b>315.487,8</b>	

**Tabela 6.** Simulirana generisana električna energija za grupu solitera S8–S11

Oznaka	Strana sveta	Površina panela (m <sup>2</sup> )	Simulirana godišnja generisana električna energija (kWh/a)	Specifična godišnja simulirana generisana električna energija (kWh/m <sup>2</sup> a)
S8	JZ	228,16	25.590,87	112,16
	JZ	228,16	24.276,37	106,40
	SZ	228,16	19.657,26	86,16
	SZ	228,16	20.075,08	87,99
S9	JZ	228,16	25.788,31	113,03
	JZ	228,16	26.065,21	114,24
	SZ	228,16	20.340,01	89,15
	SZ	228,16	20.037,81	87,83
S10	JZ	228,16	25.309,88	110,93
	JZ	228,16	25.309,55	110,93
	SZ	228,16	16.138,32	70,73
	SZ	228,16	15.332,30	67,20
S11	JZ	228,16	27.248,99	119,43
	JZ	228,16	27.899,44	122,28
	SZ	228,16	19.037,75	83,44
	SZ	228,16	19.425,53	85,14
<b>UKUPNO</b>		<b>3.650,56</b>	<b>357.532,5</b>	

**Tabela 7.** Simulirana generisana električna energija za grupu solitera S12–S16

Oznaka	Strana sveta	Površina panela (m <sup>2</sup> )	Simulirana godišnja generisana električna energija (kWh/a)	Specifična godišnja simulirana generisana električna energija (kWh/m <sup>2</sup> a)
S12	JZ	131,63	17.291,77	131,37
	JZ	175,50	22.931,57	130,66
	SI	175,50	12.098,51	68,94
	SI	131,63	8.913,51	67,72
S13	JZ	131,63	15.471,36	117,54
	JZ	175,50	20.835,20	118,72
	SZ	175,50	13.802,17	78,64
	SZ	131,63	10.351,63	78,64
S14	JZ	131,63	17.001,94	129,17
	JZ	175,50	22.959,01	130,82
	SI	175,50	12.013,95	68,45
	SI	131,63	9.335,64	70,92
S15	JZ	131,63	16.068,58	122,08
	JZ	175,50	21.464,52	122,30
	SI	175,50	12.053,13	68,68
	SI	131,63	8.551,38	64,97
S16	JZ	131,63	15.248,41	115,84
	JZ	157,95	18.425,55	116,65
	SI	157,95	12.020,21	76,10
	SI	131,63	10.038,64	76,27
<b>UKUPNO</b>		<b>3.036,2</b>	<b>296.876,4</b>	

**Tabela 8.** Simulirana generisana električna energija za grupu solitera S17–S21

Oznaka	Strana sveta	Površina panela (m <sup>2</sup> )	Simulirana godišnja generisana električna energija (kWh/a)	Specifična godišnja simulirana generisana električna energija (kWh/m <sup>2</sup> a)
S17	JZ	157,95	20.500,69	129,79
	JZ	157,95	20.718,65	131,17
	SI	157,95	12.225,37	77,40
	SI	157,95	11.937,30	75,57
S18	JZ	157,95	20.989,88	132,89
	JZ	157,95	20.907,14	132,36
	SI	157,95	10.233,64	64,79
	SI	157,95	11.410,14	72,24
S19	JZ	157,95	20.174,84	127,73
	JZ	157,95	19.237,04	121,79
	SI	157,95	12.116,39	76,71
	SI	157,95	11.625,05	73,60
S20	JZ	157,95	20.224,84	128,04
	JZ	157,95	18.811,42	119,09
	SI	157,95	12.228,42	77,42
	SI	157,95	12.053,06	76,31
S21	JZ	157,95	18.061,86	114,35
	JZ	157,95	18.647,81	118,06
	SI	157,95	12.736,26	80,63
	SI	157,95	12.736,26	80,63
<b>UKUPNO</b>		<b>3.159</b>	<b>317.576,1</b>	

Najveći solarni potencijal u grupi solitera S8-S11 ima jedna od jugoistočno orijentisanih fasada na soliteru S11 i on iznosi 27.899,44 kWh/a, dok je najefikasnije iskorišćenje prostora na istoj fasadi i iznosi 122,28 kWh/m<sup>2</sup>a. Ukupni solarni potencijal ove grupe solitera iznosi 357.532,5 kWh/a (Tabela 6).

Najveći solarni potencijal u grupi solitera S12-S16 ima jedna od jugozapadno orijentisanih fasada na soliteru S14 i on iznosi 22.959,01 kWh/a, dok je najefikasnije iskorišćenje prostora na jednoj od jugozapadno orijentisanih fasada na soliteru S12 i iznosi 131,37 kWh/m<sup>2</sup>a. Ukupni solarni potencijal ove grupe solitera iznosi 296.876,4 kWh/a (Tabela 7).

Najveći solarni potencijal u grupi solitera S17-S21 ima jedna od jugozapadno orijentisanih fasada na soliteru S18 i on iznosi 20.989,88 kWh/a, dok je najefikasnije iskorišćenje prostora na istoj fasadi i iznosi 132,89 kWh/m<sup>2</sup>a. Ukupni solarni potencijal ove grupe solitera iznosi 317.576,1 kWh/a (Tabela 8).

Ukupan solarni potencijal svih fasada posmatranih solitera grada Kragujevca iznosi 1.545.994 kWh/a uz ukupno 15.690,16 m<sup>2</sup> solarnih panela.

Rezultati očekivano pokazuju da se, na istom soliteru, generiše značajnije više električne energije na fasadama orijentisanim ka jugoistoku i jugozapadu, u odnosu na fasade na suprotnoj strani sveta. Međutim, ovaj odnos varira kako od grupe do grupe solitera, tako i među soliterima iste grupe. Ovo je posledica orijentacije samog solitera a zatim i senki koje stvaraju objekti i drveće iz okruženja. Od objekata iz okoline, zbog svoje visine, na proizvodnju električne energije najviše utiču okolni soliteri iz grupe.

Kod solitera iz grupe S1-S2 na fasadama sa jugoistočne strane sveta se generiše 1,7 puta više električne energije u odnosu na fasade na severozapadnoj strani sveta, dok se u grupi solitera S4-S7 na fasadama sa jugozapadne strane sveta generiše 2,1-2,7 puta više električne energije u odnosu na fasade na severoistočnoj strani sveta. Soliteri iz grupe S8-S11 na fasadama sa jugoistočne strane sveta generišu 1,3-1,6 puta više električne energije u odnosu na fasade na severozapadnoj strani sveta, dok soliteri iz grupe S12-S16 na fasadama sa jugozapadne strane sveta generišu 1,5-1,9 puta više električne energije u odnosu na fasade na severoistočnoj strani sveta. U grupi solitera S17-S21 na fasadama sa jugozapadne strane sveta se generiše 1,4-1,9 puta više električne energije u odnosu na fasade na severoistočnoj strani sveta. Kod solitera S3 sve četiri fasade su orijentisane ka suprotnim stranama sveta i na južnoj fasadi se generiše 2,3 puta više električne energije nego na severnoj. Ovo je izuzetak u odnosu na ostale solitere kod kojih su fasade orijentisane u pravcima severoistok–jugozapad i severozapad–jugoistok. Rezultati pokazuju da je veća razlika u generisanoj električnoj energiji suprotno orijentisanih fasada solitera u slučaju kada se one nalaze u pravcu severoistok - jugozapad.

Pošto je u izučavanim soliterima, od svih vrsta energije, najveća potrošnja toplotne energije za grejanje prostora, izvršeno je poređenje ove energije sa energijom koja bi se generisala upotrebom fotonaponskih sistema. Podaci o godišnjoj potrošnji toplotne energije u soliterima dobijeni su korišćenjem energetskog modela, koji na osnovu izmerene realne potrošnje u dva solitera predviđa potrošnju toplotne energije u svim ostalim

soliterima [32]. Toplotna energija potrebna za zagrevanje solitera, izražena u kWh/a, upoređena je sa simuliranom godišnjom električnom energijom, da bi se odredilo koliki deo toplotnog kapaciteta bi mogao teorijski da bude pokriven iz solarne energije. Ovo bi takođe značilo da bi van grejne sezone generisana električna energija bila predata u sistem distribucije električne energije, a u grejnoj sezoni bi bila preuzeta iz sistema. Analiza pokazuje da energija dobijena iz fotonaponskih sistema predstavlja 10,1-26,9% energije potrebne za grejanje, pri čemu je ovaj procenat najveći kod solitera sa najmanjom površinom osnove i najmanjim brojem spratova – grupa solitera S12-S16. Očigledno je da je energija potrebna za grejanje dosta veća od energije koja se može generisati fotonaponskim panelima. Ovakva potrošnja toplotne energije se objašnjava velikom zapreminom prostora koji se greje, nedovoljnom toplotnom izolacijom u termičkom omotaču, velikim brojem prozora, kao i velikim ventilacionim gubicima koji su karakteristični za solitere.

Generisana električna energija se može prodavati kao električna energija iz obnovljivih izvora, ako za to postoje uslovi, ili se pre svega koristiti od strane stanara solitera, zbog tendencije konstantnog rasta cene ovog energenta.

Proučavanje investicije u sisteme fotonaponskih panela kao i ostalih finansijskih pokazatelja isplativosti je jedna od najbitnijih tema u procesu odlučivanja o ulaganju u ove sisteme obnovljive energije. Iako ovim istraživanjem nije obuhvaćena procena finansijske isplativosti ulaganja u fotonaponske sisteme, proračunom godišnje specifične generisane električne energije je utvrđeno na kojim fasadama je najveće iskorišćenje prostora za postavljanje fotonaponskih panela, tj. gde je najveći solarni potencijal po jedinici površine. Solarni potencijal veći od 130 kWh godišnje po jedinici površine fotonaponskih panela od posmatranih osamdeset četiri fasada, ima njih dvanaest, i one predstavljaju mesta na soliterima na kojima je najveća moguća proizvodnja električne energije po jedinici površine ovih sistema.

Instalacija fotonaponskih sistema na samo jednoj spoljašnjoj fasadi solitera može pokrenuti pitanje estetike i zadovoljavanja urbanističkih zahteva. Ipak, ravnotežu između urbanizma i finansijske isplativosti investicija treba pronaći u dijalogu predstavnika gradskih uprava za urbanizam, stanara solitera i investitora, koji mogu biti i sami stanari.

## VIII ZAKLJUČAK

Za dvadeset i jedan soliter u jezgru grada Kragujevca, formirane su maksimalno iskorišćene površine na vertikalnim fasadama i određen je njihov solarni potencijal simulacijom generisane električne energije iz fotonaponskih panela u programu EnergyPlus. Simulacije su sprovedene uz ograničavajuće faktore senki koje stvaraju objekti i drveće iz okruženja, a naročito okolni soliteri. Za svaku od četiri fasade na svakom soliteru, podobne za instalaciju fotonaponskog sistema, određena je godišnja generisana električna energija, kao i specifična godišnja generisana električna energija po jedinici površine fotonaponskih panela.

Ukupan solarni potencijal svih fasada posmatranih solitera u gradu Kragujevcu iznosi 1.545.994 kWh/a, uz ukupno 15.690,16 m<sup>2</sup> solarnih panela, dok najefikasnije iskorišćenje prostora na jednoj od fasada iznosi 138,68 kWh/m<sup>2</sup>a.

Rezultati dobijeni ovim istraživanjem mogu biti veoma korisni za investitore jer pružaju podatke o mogućoj godišnjoj količini električne energije koja se može generisati na fasadama posmatranih solitera, kao i o površinama sa najvećim solarnim potencijalom, odnosno najvećom generisanom električnom energijom po jedinici površine fotonaponskih panela.

#### LITERATURA/REFERENCES

- [1] Stefanovic, A., Gordic, D. Modeling methodology of the heating energy consumption and the potential reductions due to thermal improvements of staggered block buildings, *Energy and Buildings*, Vol. 125, pp. 244-253, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.058>
- [2] Alves, T., Machado, L., de Souza, R. D., de Wilde, P. Assessing the energy saving potential of an existing high-rise office building stock, *Energy and Buildings*, Vol. 173, pp. 547-561, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.044>
- [3] Freitas, S., Brito, M. C. Solar façades for future cities, *Renewable Energy Focus*, Vol. 31, pp. 73-79, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2019.09.002>
- [4] Wang, Y., Mauree, D., Sun, Q., Lin, H., Scartezzini, J. L., Wennersten, R. A review of approaches to low-carbon transition of high-rise residential buildings in China, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 131, 109990, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109990>
- [5] Giouri, E. D., Tenpierik, M., Turrin, M. Zero energy potential of a high-rise office building in a Mediterranean climate: Using multi-objective optimization to understand the impact of design decisions towards zero-energy high-rise buildings, *Energy and Buildings*, Vol. 209, 109666, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109666>
- [6] Weerasuriya, A. U., Zhang, X., Gan, V. J. L., Tan, Y. A holistic framework to utilize natural ventilation to optimize energy performance of residential high-rise buildings, *Building and Environment*, Vol. 153, pp. 218-232, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.027>
- [7] Qin, H., Pan, W. Energy use of subtropical high-rise public residential buildings and impacts of energy saving measures, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 254, 120041, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120041>
- [8] Gan, V. J. L., Wong, H. K., Tse, K. T., Cheng, J. C. P., Lo, I. M. C., Chan, C. M. Simulation-based evolutionary optimization for energy-efficient layout plan design of high-rise residential buildings, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 231, pp. 1375-1388, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.324>
- [9] Jang, H., Kang, J. An energy model of high-rise apartment buildings integrating variation in energy consumption between individual units, *Energy and Buildings*, Vol. 158, pp. 656-667, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.047>
- [10] Lotfabadi, P. Analyzing passive solar strategies in the case of high-rise building, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 52, pp. 1340-1353, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.189>
- [11] Lotfabadi, P. Solar considerations in high-rise buildings, *Energy and Buildings*, Vol. 89, pp. 183-195, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.044>
- [12] Chen, X., Yang, H., Peng, J. Energy optimization of high-rise commercial buildings integrated with photovoltaic facades in urban context, *Energy*, Vol. 172 pp. 1-17, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.112>
- [13] Kosorić, V., Lau, S., Tablada, A., Lau, S. S. General model of Photovoltaic (PV) integration into existing public high-rise residential buildings in Singapore – Challenges and benefits, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 91, pp. 70-89, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.087>
- [14] Ghazali, A., Salleh, E. I., Haw, L. C., Mat, S., Sopian, K. Performance and Financial Evaluation of Various Photovoltaic Vertical Facades on High-rise Building in Malaysia, *Energy and Buildings*, Vol. 134, pp. 306-318, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.003>
- [15] Saretta, E., Bonomo, P., Frontini, F. A calculation method for the BIPV potential of Swiss facades at LOD2.5 in urban areas: A case from the Ticino region, *Solar energy*, Vol. 195, pp. 150-165, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.062>
- [16] Lazović, Đ., Džodić, K., Đurišić, Ž., Analiza ekonomske opravdanosti investiranja u solarnu elektranu sa vertikalno postavljenim bifacijalnim fotonaponskim modulima u perspektivnim uslovima slobodnog tržišta, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 23, No. 3, pp. 37-44, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEE21-3.37L>
- [17] Brito, M. C., Freitas, S., Guimarães, S., Catita, C., Redweik, P. The importance of facades for the solar PV potential of a Mediterranean city using LiDAR data, *Renewable Energy*, Vol. 111, pp. 85-94, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.085>
- [18] Suomalainen, K., Wang, V., Sharp, B. Rooftop solar potential based on LiDAR data: Bottom-up assessment at neighbourhood level, *Renewable Energy*, Vol. 111, pp. 463-475, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.025>
- [19] Martínez-Rubio, A., Sanz-Adan, F., Santamaría-Peña, J., Martínez, A. Evaluating solar irradiance over facades in high building cities, based on LiDAR technology, *Applied Energy*, Vol. 183, pp. 133-147, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.163>
- [20] Zhong, Q., Tong, D. Spatial layout optimization for solar photovoltaic (PV) panel installation, *Renewable Energy*, Vol. 150, pp. 1-11, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.099>
- [21] Mishra, T., Rabha, A., Kumar, U., Arunachalam, K., Sridhar, V. Assessment of solar power potential in a hill state of India using remote sensing and Geographic Information System, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, Vol. 19, 100370, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100370>
- [22] Jovanović Popović, M., Ignjatović, D., Radivojević, A., Rajčić, A., Đukanović Lj., Čuković N., Nedić M. *Atlas višeporodičnih zgrada Srbije*, Univerzitet u Beogradu, Arhitektonski fakultet, Beograd, 2013.
- [23] Henninger, R., Witte, M., Crawley, D. Analytical and comparative testing of EnergyPlus using IEA HVAC BESTEST E100-E200 test suite, *Energy and Buildings*, Vol. 36, pp. 855-863, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.025>
- [24] US DOE, EnergyPlus: Testing and Validation, <https://energyplus.net/testing> [pristupljeno 02.01.2022.]
- [25] Crawley, D.B., Hand, J.W., Kummert, M., Griffith, B.T. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs, *Building and Environment*, Vol. 43, pp. 661-673, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.027>
- [26] Yadav, S., Hachem-Vermette, C., Panda, S. K., Tiwari, G.N., Mohapatra, S.S. Determination of optimum tilt and azimuth angle of BiSPVT system along with its performance due to shadow of adjacent buildings, *Solar Energy*, Vol. 215, pp. 206-219, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.12.033>
- [27] Mukisa, N., Zamora, R. Optimal tilt angle for solar photovoltaic modules on pitched rooftops: A case of low latitude equatorial region, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 50, 101821, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101821>
- [28] Krstić, N., Klimenta, D., Tasić, D., Radosavljević, D., Određivanje optimalnih nagibnih uglova fotonaponskih panela uz uvažavanje smanjenja direktne komponente iradijacije usled efekata senki u fotonaponskim sistemima, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 23, No. 3, pp. 45-53, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEE21-3.45K>
- [29] Meteororm Software, <https://meteororm.com/en/> [pristupljeno 02.01.2022.]
- [30] Kyocera KD 300-80 F Series, <https://www.ervsolar.com/shared/pdf/Kyocera/KD320GX-LFB.pdf> [pristupljeno 02.01.2022.]
- [31] Input Output Reference, <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/9-6/input-output-reference/overview.html#input-output-reference> [pristupljeno 02.01.2022.]
- [32] Stefanović, A., *Optimizacija potrošnje energije za grejanje višeporodičnog stambenog građevinskog fonda grada korišćenjem energetskog modela*, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac, 2016.

#### AUTORI/AUTHORS

dr **Andreja Stefanović**, andreja2202@gmail.com, ORCID [0000-0003-3641-1074](https://orcid.org/0000-0003-3641-1074)