

Analiza kapaciteta i uslova izgradnje fotonaponskih sistema na krovovima školskih objekata u Srbiji

Analysis of capacities and conditions of photovoltaic systems construction on the school buildings roofs in Serbia

Iva Batić*, Željko Đurišić*

* Elektrotehnički fakultet, Univerziteta u Beogradu

Apstrakt- Školski objekti i pripadajuće fiskulturene sale predstavljaju značajan potencijal za izgradnju fotonaponskih (FN) panela, koji bi bili integrisani u krovove ovih objekata. S obzirom da su krovne površine pasivne, izgradnja fotonaponskih sistema ne narušava funkcionalnost objekta, niti na bilo koji način negativno utiče na okolinu. Instalacijom fotonaponskih sistema na krovovima školskih objekata u maksimalnoj mogućoj meri se približavaju proizvodnja i potrošnja električne energije, pa ovakvi sistemi obezbeđuju značajno smanjenje gubitaka električne energije u distributivnoj i prenosnoj mreži. Osim lokalne proizvodnje električne energije, izgradnjom fotonaponskih sistema na krovovima školskih objekata postiže se i edukativan efekat. Inсталacijom merno-akvizicionog sistema koji bi merne podatke o parametrima proizvodnje fotonaponske elektrane i potrošnje električne energije škole uključio u školske laboratorije, đacima bi se približila tehnologija, kao i sagledavanje mogućnosti podmirivanja električne energije iz ovog osnovnog obnovljivog izvora energije. U ovom radu prikazani su rezultati procena kapaciteta raspoloživih krovnih površina školskih objekata u Srbiji za instalaciju fotonaponskih panela. Za svaku kategoriju školskog objekta izvršena je procena moguće godišnje proizvodnje po jedinici prosečne krovne površine. Sumiranjem svih rezultata, date su procene moguće instalisane snage i godišnje proizvodnje električne energije za različite scenarije.

Ključne reči - školski objekti, fiskulturene sale, krovne površine, fotonaponski sistemi, instalisana snaga

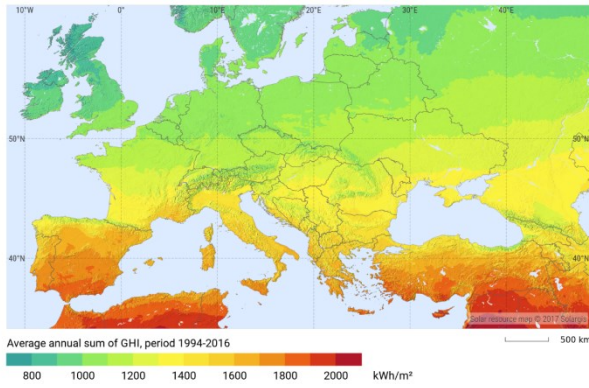
Abstract - School and school gym buildings represent a relevant potential for construction of photovoltaic panels, to be integrated into roofs of these buildings. Given that roof structures are passive, construction of photovoltaic systems does not interfere with the building functionality, does not in any way adversely affect the environment. Installation of photovoltaic systems on building roofs brings the production and consumption of electricity closest possible, therefore such systems ensure significant reduction in power losses in transmission and

distribution grids. In addition to locally produced electricity, construction of photovoltaic systems on the school buildings' roofs produces an educational effect as well. By installing a measuring and acquisition system which would include the measuring data on the photovoltaic power plant production parameters and school electricity consumption into school labs, technology would be closer to students, as well as possibilities to meet the demand for electricity from this basic renewable energy source. This paper presents the results of evaluations of the available roof surfaces of school buildings in Serbia for the photovoltaic panels installation. For each category of school building, an estimate of possible annual production per unit of average roof area was made. Summarizing all the results, estimates of possible installed capacity and annual electricity production for different scenarios are given.

Keywords - school buildings, school gym buildings, roof tops, photovoltaic systems, installed power

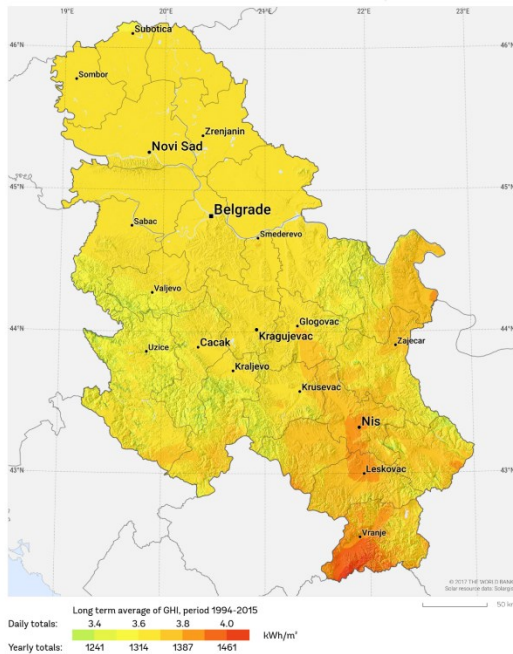
UVOD

Školski objekti, kao i njihove pripadajuće fiskulturene sale predstavljaju značajan potencijal za izgradnju fotonaponskih panela integrisanih u krovove ovih objekata čija izgradnja ne bi narušavala funkcionalnost objekta, niti na bilo koji način negativno uticala na životnu sredinu. Količina električne energije koja se može dobiti iz fotonaponskih sistema pre svega zavisi od dozračene solarne energije na lokaciji objekta koji se analizira. Snaga solarnog zračenja na površini Zemlje zavisi od više faktora, a to su: geografska širina, oblačnost, godišnje doba i doba dana. Realna slika prosečne godišnje insolacije na horizontalnoj površini (*Global Horizontal Irradiation* – GHI) za Evropu prikazana je na slici 1.



Slika 1. Solarni potencijal Evrope [1]

Na osnovu slike 1. može se izvesti zaključak da Srbija ima energetska potencijala solarnog zračenja koji je preko 30% veći od energetska potencijala solarnog zračenja u Nemačkoj, koja je lider u proizvodnji električne energije iz fotonaponskih sistema u Evropi.



Slika 2. Solarni potencijal Srbije [1]

Na slici 2. prikazana je mapa globalnog potencijala solarnog zračenja na teritoriji Republike Srbije. Može se zaključiti da prosečna godišnja dozračenja energija sunca po jedinici horizontalne površine na otvorenom terenu iznosi od 1450 kWh/m² na jugu, do oko 1250 kWh/m² na severu Srbije.

MATEMATIČKI MODEL ZA PROCENU PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE KROVNO INTEGRISANIH FOTONAPONSKIH PANELA

Prosečna električna snaga koju fotonaponski panel injektira u distributivnu mrežu (P_{PVi}) u svakom satu i je definisana sledećom relacijom:

$$P_{PVi} = \eta P_{PVSTC} \frac{I_{PVi}}{I_{STC}} \cdot (1 + \alpha_{TPV}(T_{PVi} - T_{STC})) \quad (1)$$

gde su:

P_{PVSTC} – deklarirana snaga fotonaponskih panela pri standardnim test uslovima (*Standard Test Conditions - STC*);

I_{PVi} – solarna iradijacija na površini FN panela u satu i ;

$I_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2$ – solarna iradijacija koja odgovara STC;

η – stepen iskorišćenja sistema;

α_{TPV} – temperaturni koeficijent promene efikasnosti FN panela, tipično iznosi $\alpha_{TPV} = -0.5 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$;

$T_{STC} = 25^{\circ}\text{C}$ – temperatura FN panela pri STC;

T_{PVi} – temperatura panela u satu i .

Insolacija na površini panela u satu i zavisi od geografske pozicije objekta, azimutnog i altitudnog ugla FN panela, oblačnosti i senke koju mogu stvarati okolni objekti i brda. Ukupni stepen iskorišćenja sistema η uvažava gubitke usled zaprljanja panela, neuparenosti modula u stringu, degradaciju efikasnosti panela u toku eksploatacije, gubitaka na invertoru i gubitaka u elektirčnim vezama. Tipična vrednost efikasnosti sistema u prosečnoj godini eksploatacije FN panela iznosi $\eta = 0,85\%$.

Smanjenje efikasnosti fotonaponske konverzije sa porastom temperature je obuhvaćeno sa koeficijentom α_{TPV} . Procena temperature FN panela se obično vrši na osnovu ambijentalne temperature prema sledećoj relaciji:

$$T_{PVi} = T_{ambi} + \left(\frac{NOCT-20}{800} \right) \cdot I_{PVi} \quad (2)$$

gde je T_{ambi} – ambijentalna temperatura u analiziranom satu i .

Parametar NOCT (*Normal Operation Cell Temperature*) je temperatura solarnog modula pri ambijentalnoj temperaturi od 20 °C, solarnoj iradijaciji od 800 W/m² i brzini vetra od 1 m/s. Ovaj parametar se standardno dobija od proizvođača FN modula. Njegova tipična vrednost je NOCT=47 °C.

Za precizne proračune proizvodnje fotonaponskih panela i estimaciju njihovih dnevnih dijagrama proizvodnje potrebno je posedovati podatke o komponentama solarne iradijacije (direktnoj i difuzionoj) na ciljnoj lokaciji, ambijentalnoj temperaturi na mestu analiziranog objekta, geometrijskim elementima konstrukcije, zasenčenju okolnih objekata, tehničkim parametrima fotonaponskih modula i invertora i eksploatacionim uslovima.

Procena ukupne godišnje proizvodnje električne energije krovno integriranih fotonaponskih panela može se izvršiti na osnovu dostupnih podataka o ukupnoj insolaciji na horizontalnoj površini, ambijentalnoj temperaturi i prostornoj orijentaciji fotonaponskih panela. Razvijeno je više softvera, koji imaju višegodišnje baze mernih podataka pomoću kojih je moguće izvršiti proračun godišnje proizvodnje fotonaponskih panela.

Jedan od često korišćenih softvera je PVGIS, čiji je razvoj finansiran od strane Evropska komisije. To je besplatni online program za proračun Sunčevog potencijala kao i proizvodnje energije samostalnih ili mrežno povezanih fotonaponskih panela u Evropi ili Africi. Proračun potencijala i proizvodnje električne energije iz fotonaponskih sistema, na mesečnom ili godišnjem

nivou, vrši se na osnovu zadatog broja modula i njihove prostorne orijentacije. Program vrši procenu direktne, difuzione i reflektovane komponente solarnog zračenja kombinujući model pri vedrom danu (*clear-day* model) i realne podatke o ukupnoj insolaciji, merene pod uglovima od 0°, 15°, 25° i 40°. Program sadrži satelitski snimak terena koji se analizira, tako da se prilikom proračuna iradijacije na površini FN panela uzima u obzir i efekat senki koje potiču od okolnih objekata i reljefa terena. Program daje informacije o srednjoj iradijaciji za svaki mesec, kao i za čitavu godinu.

METODOLOGIJA ZA PROCENU PROIZVODNJE FOTONAPONSKIH PANELA INTEGRISANIH U KROVOVE ŠKOLSKIH OBJEKATA U SRBIJI

Školski objekti poseduju značajan potencijal za izgradnju fotonaponskih panela na svojim krovovima. S obzirom da su krovne površine pasivne, izgradnja fotonaponskih sistema ne narušava funkcionalnost objekta, niti na bilo koji način negativno utiče na okolinu. Osim lokalne proizvodnje električne energije, izgradnjom fotonaponskih sistema na krovovima školskih objekata postiže se i edukativan efekat. U tom pogledu, preporučuje se instalacija merno-akvizicionog sistema koji bi merne podatke o parametrima proizvodnje fotonaponske elektrane i potrošnje električne energije škole uključili u školske laboratorije i na taj način približili đacima tehnologije i kvantitativno sagledavanje efekata podmirivanja potreba za električne energije školskog objekta iz ovog osnovnog obnovljivog izvora energije. Proračun električne energije koja se može dobiti iz fotonaponskih sistema integrisanih u krove škole objekata je izvršena na osnovu: potencijala solarne energije na pretpostavljenoj lokaciji objekata, raspoložive krovne površine i njene prostorne orijentacije i efikasnosti fotonaponskih modula.

U tabeli 1. prikazani su osnovni podaci o solarnom potencijalu i mogućnostima proizvodnje električne energije krovno integrisanih fotonaponskih panela na različitim lokacijama u Srbiji. Prikazane su proračunate vrednosti optimalnih nagibnih i azimutnih uglova fotonaponskih panela pri kojima je godišnja proizvodnja električne energije maksimalna.

Dati su podaci o godišnjoj insolaciji i proceni neto godišnje proizvodnje električne energije fotonaponskih panela postavljenih pod proračunatim optimalnim nagibnim i azimutnim uglom. Proračuni su dati za sve veće gradove u Srbiji, tako da praktično pokrivaju celu teritoriju Republike Srbije. Proračuni očekivane neto godišnje proizvodnje, koji su prikazani u poslednjoj koloni u tabeli 1, urađeni su pod sledećim pretpostavkama: *Površina na kojoj je instaliran fotonaponski panel se nalazi na otvorenom terenu bez senki i fotonaponski panel je realizovan sa silicijumskim fotonaponskim ćelijama čija nazivna (STC) efikasnost iznosi 17%.*

Tabela 1. Proračunate vrednosti insolacije i moguće proizvodnje električne energije fotonaponskih panela za više lokacije u Srbiji, dobijeni na osnovu proračuna u PVGIS softveru [2]

	Koordinate WGS 84	Reprezentativni grad	Okolni gradovi	Optimalna orijentacija panela		Srednja godišnja iradijacija (Wh/m ² /dan)		Neto godišnja proizvodnja FN sistema E _t (kWh/m ² /god)
				Nagibni ugao	Azimut	Na horizontalnu ravan	Na optimalno orijentisanu ravan	Na optimalno orijentisanu ravan
1	46°05'36"N 19°40'06"E	Subotica	Horgoš, Palic, Senta	35,0°	-1,0°	3428	3908	186
2	45°46'09"N 19°07'21"E	Sombor	Crvenka, Kula	34,0°	-1,0°	3372	3816	182
3	45°46'09"N 19°07'21"E	Novi Sad	B. Palanka, Ruma, Zrenjanin	34,0°	0,0°	3549	4034	192
4	45°06'59"N 21°17'59"E	Vršac	Zrenjanin, Bela Crkva, Kovin	35,0°	0,0°	3644	4166	198
5	44°44'05"N 20°33'21"E	Beograd	Zemun, Pančevo, Obrenovac	33,0°	2,0°	3616	4104	195
6	44°37'26"N 21°11'28"E	Požarevac	Šumadijci, V. Plana, Svinjaci	34,0°	0,0°	3643	4140	196
7	44°18'14"N 19°53'53"E	Valjevo	Loznica, Ljig, Aranđelovac	34,0°	-1,0°	3649	4167	198
8	44°00'59"N 20°54'59"E	Kragujevac	Lapovo, Topola, Cuprija, Praćin	34,0°	-1,0°	3708	4214	200
9	43°53'22"N 20°21'22"E	Čačak	G. Milanovac, Užice, Kraljevo	35,0°	-3,0°	3752	4286	204
10	43°53'59"N 22°16'59"E	Zaječar	Bor, Knjaževac, Negotin	32,0°	-3,0°	3641	4070	192
11	43°34'59"N 21°19'59"E	Kruševac	Trstenik, Stalac, Aleksandrovac	33,0°	-3,0°	3771	4259	202
12	43°27'59"N 19°47'59"E	Novi Varoš	Prijepolje, Priboj	36,0°	-3,0°	3792	4406	214
13	43°18'59"N 21°53'02"E	Niš	Aleksinac, Blace, Prokuplje	32,0°	-3,0°	3696	4136	196
14	43°08'59"N 22°34'59"E	Pirot	Dimitrovgrad, B. Palanka	32,0°	-1,0°	3698	4001	190
15	43°08'30"N 20°31'22"E	Novi Pazar	Raska, Tutin, Sjenica	35,0°	3,0°	3894	4457	213
16	42°58'59"N 21°56'59"E	Leskovac	Vlasotince, Lebane, C. Trava	32,0°	-3,0°	3744	4189	198
17	42°53'02"N 20°52'31"E	Mitrovica	Pristina, Leposavić	34,0°	-3,0°	3885	4425	211
18	42°33'21"N 21°54'37"E	Vranje	Bujanovac, Gnjani, Preševo	33,0°	-2,0°	3676	4140	198
19	42°22'59"N 20°24'59"E	Đakovica	Đečani, Orahovac	33,0°	0,0°	4007	4587	218
20	42°12'48"N 20°44'53"E	Prizren	Dragaš, Suva Reka	34,0°	4,0°	3961	4500	214

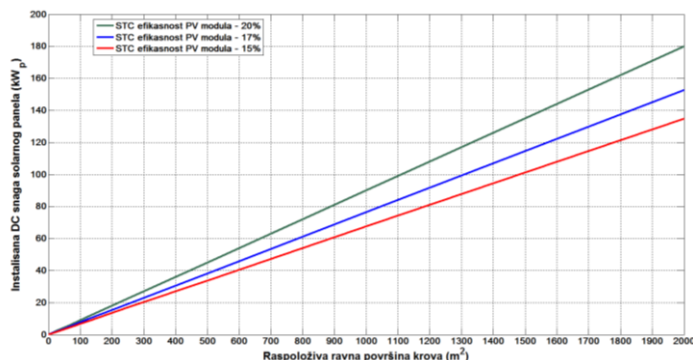
Podaci prikazani u tabeli 1 omogućavaju orijentacionu procenu očekivane godišnje proizvodnje električne energije koja se može dobiti iz FN panela u različitim regionima u Srbiji. U koloni *Optimalna orijentacija panela* dat je podatak o nagibnom i azimutnom uglu FN panela pri kojem će godišnja proizvodnja električne energije biti maksimalna. U poslednjoj koloni u tabeli 1 dat je podatak o očekivanoj prosečnoj godišnjoj proizvodnji električne energije koja se može postići po jedinici površine FN panela kada je on optimalno prostorno orijentisan. Može se zaključiti da se najbolje iskorišćenje investicije u izgradnju fotonaponskih panela može ostvariti na jugu Srbije, gde se može očekivati oko 218 kWh/m²/

god, dok je najmanja proizvodnja na severu, gde iznosi 182 kWh/m²/god. Upotrebom fotonaponskih panela sa većom efikasnošću (>17%), specifična proizvodnja po jedinici krovne površine se može proporcionalno povećati. Zaključak sprovedene analize je da je varijacija solarnog potencijala na teritoriji Srbije relativno mala i da je izgradnja fotonaponskih panela sa aspekta potencijala opravdana u svim regionima u Srbiji.

METODOLOGIJA ZA PROCENU PROIZVODNJE FOTONAPONSKIH PANELA INSTALISANIH NA KONSTRUKCIJAMA SA RAVNIM KROVOVIMA

Značajan broj škola i pripadajućih fiskulturnih sala u Srbiji ima ravne krove. Kosi krovovi čiji je nagib manji od 10° se mogu tretirati kao ravni krovovi. Ravni krovovi omogućavaju da se na njima može postaviti noseća konstrukcija sa optimalnom orijentacijom (azimutnim i nagibnim uglom). Optimalni azimutni ugao se može usvojiti da je 0°, odnosno da je fotonaponski

modul južno orijentisan. Za optimalni nagibni ugao može se usvojiti 33° . Kod izgradnje konstrukcije mora se voditi računa o međusobnom rastojanju redova fotonaponskih panela tako da ne dolazi do međusobnog zasenčenja. Na grafikonu 1 prikazani su rezultati proračuna maksimalno mogućeg kapaciteta za instalaciju fotonaponskih panela na ravnoj krovnoj površini.



Grafikon 1. Maksimalna instalirana snaga fotonaponskih panela sa modulima visoke (20%), srednje (17%) i niske (15%) efikasnosti na ravnoj površini krova

Pretpostavljeno je da se moduli postavljaju pod optimalnim nagibnim uglom. Razmatrane su opcije realizacije fotonaponskih panela sa modulima visoke (20%), srednje (17%) i niske (15%) efikasnosti. Instalirana snaga se odnosi na snagu na priključcima panela (DC snagu) pri standardnim (STC) uslovima. U analizama koje slede procena specifične snage i proizvodnje fotonaponskih panela je vršena uz pretpostavku da se instaliraju fotonaponski paneli efikasnosti 17%. Uz ovu pretpostavku, procena snage fotonaponskih panela (P_{PV}), koja se može instalirati na određenoj ravnoj krovnoj površini, može se izvršiti na osnovu sledeće relacije:

$$P_{PV}(\text{kW}_p) = 0.0765 * A(\text{m}^2), \quad (3)$$

gde je $A(\text{m}^2)$ – raspoloživa ravna površina krova na kojoj se postavljaju fotonaponski paneli.

Procena godišnje proizvodnje električne energije (E) fotonaponskih panela instaliranih na nosećim konstrukcijama na ravnim krovovima objekata može se izvršiti prema sledećoj relaciji:

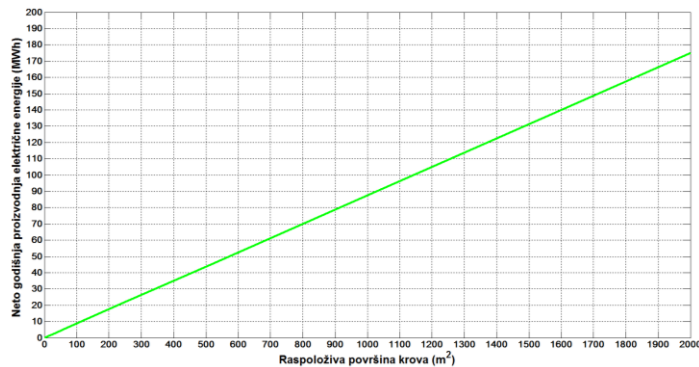
$$E(\text{kWh}) = 0,45 * E_1 \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right) * A(\text{m}^2), \quad (4)$$

gde su: $E_1 \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right)$ – brojni podatak prikazan u poslednjoj koloni tabele 1,

$A(\text{m}^2)$, – raspoloživa horizontalna površina krova na kojoj se postavljaju fotonaponski paneli,

0,45 – koeficijent koji uvažava neophodno minimalno rastojanje između redova panela.

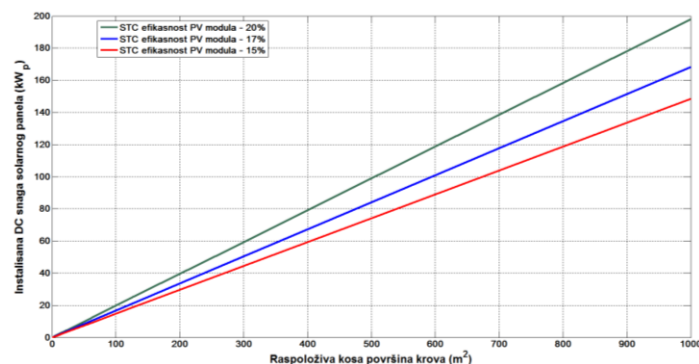
Prethodna relacija je izvedena pod pretpostavkom da je fotonaponski panel izveden u redovima koji su optimalno prostorno orijentisani. Dobijena analitička relacija je ilustrovana grafikonom 2 za otvoren prostor u regionu Beograda.



Grafikon 2. Procena godišnje proizvodnje FN sistema instaliranog na ravnoj površini krova školskog objekta na otvorenom terenu u regionu Beograda na konstrukciji koja obezbeđuje optimalan azimutni i nagibni ugao FN sistema

METODOLOGIJA ZA PROCENU PROIZVODNJE FOTONAPONSKIH PANELA INSTALISANIH NA KONSTRUKCIJAMA SA KOSIM KROVOVIMA

Krovovi čiji je nagib veći od 10° se tretiraju kao kosi krovovi i na njima se fotonaponski panel formira tako što se fotonaponski moduli polažu na konstrukciji po površini krova (prate nagib i azimutni ugao krova). Na grafikonu 3 prikazani su rezultati proračuna maksimalno mogućeg kapaciteta za instalaciju FN panela na proizvoljnoj kosoj površini krova.



Grafikon 3. Maksimalna instalirana snaga fotonaponskih panela sa modulima visoke (20%), srednje (17%) i niske (15%) efikasnosti na kosoj površini krova

Razmatrane su opcije realizacije fotonaponskih panela sa modulima visoke (20%), srednje (17%) i niske (15%) efikasnosti. Instalirana snaga se odnosi na DC snagu na priključcima panela pri standardnim (STC) uslovima.

U tabeli 2. dati su podaci o optimalnoj orijentaciji (nagibnom i azimutnom uglu) površine pri kojoj se postiže maksimalna godišnja proizvodnja električne energije fotonaponskih panela. Svako odstupanje od naznačenih vrednosti dovodi do smanjenja godišnje proizvodnje električne energije po jedinici površine krova, odnosno po jedinici instalirane snage FN panela. Noseće konstrukcije fotonaponskih panela bi se mogle postaviti tako da

obezbeđuju optimalnu orijentaciju, ali su se pokazale u praksi nepraktičnim i najčešće nisu ekonomski opravdane. U analizama koje slede, procena specifične snage i poroizvodnje fotonaponskih panela je vršena uz pretpostavku da se instaliraju fotonaponski paneli efikasnosti 17%. Uz ovu pretpostavku, procena snage fotonaponskih panela (P_{PV}) koja se može instalirati na određenoj kosoj krovnoj površini se može izvršiti na osnovu sledeće relacije:

$$P_{PV}(\text{kW}_p) = 0,17 * A(\text{m}^2), \quad (5)$$

gde je $A(\text{m}^2)$ – raspoloživa površina krova na koju je postavljen FN panel.

Procena godišnje proizvodnje električne energije fotonaponskih panela (E) instaliranih na kosim krovovima školskih objekata može se izvršiti prema sledećoj relaciji:

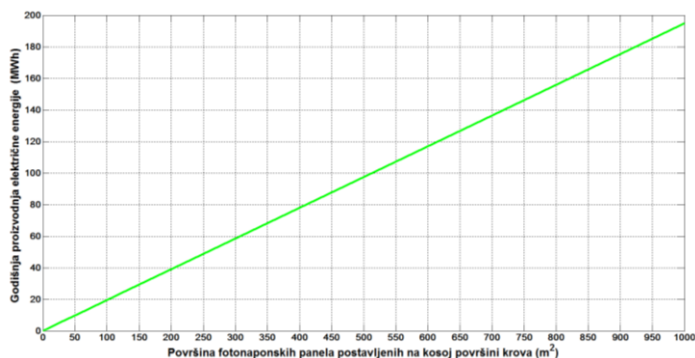
$$E(\text{kWh}) = k * E_1 \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right) * A(\text{m}^2), \quad (6)$$

gde su: $E_1 \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right)$ – brojni podatak dat u poslednjoj koloni tabele 1.

$A(\text{m}^2)$, – raspoloživa kosa površina krova,

k – koeficijent koji uvažava redukciju proizvodnje FN panela zbog odstupanja azimutnog i nagibnog ugla od optimalnih vrednosti.

Dobijena analitička relacija je ilustrovana grafikonom 4.



Grafikon 4. Procena godišnje proizvodnje FN sistema instaliranog na kosoj optimalno orijentisanoj površini krova školskog objekta u Beogradu

Vrednosti koeficijenta k za različite nagibne i azimutne uglove analizirane krovne površine su dati u tabeli 2. U obzir su uzeti samo azimutni uglovi u opsegu istok-jug-zapad pošto na severno orijentisanim krovnim površinama ne postoji ekonomska opravdanost za postavljanje fotonaponskih panela.

Tabela 2. Vrednosti korekcionog koeficijenta k za različite prostorne orijentacije FN panela

Nagibni ugao krovne površine	Azimutni ugao krovne površine																		
	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88
5	0,88	0,89	0,89	0,90	0,91	0,91	0,91	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,91	0,91	0,90	0,90	0,89	0,89	0,88
10	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,88	0,87
15	0,88	0,89	0,91	0,92	0,94	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95	0,93	0,92	0,90	0,88	0,87
20	0,87	0,88	0,91	0,93	0,95	0,96	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,97	0,96	0,96	0,94	0,92	0,90	0,88	0,86
25	0,86	0,88	0,91	0,93	0,95	0,96	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,97	0,96	0,94	0,92	0,89	0,87
30	0,84	0,88	0,90	0,93	0,95	0,96	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00	0,99	0,97	0,96	0,94	0,92	0,89	0,86	0,83
35	0,83	0,86	0,89	0,92	0,95	0,96	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00	0,99	0,97	0,96	0,94	0,91	0,88	0,85	0,82
40	0,81	0,85	0,88	0,91	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99	0,98	0,97	0,95	0,93	0,90	0,87	0,84	0,80
45	0,79	0,83	0,87	0,90	0,93	0,95	0,96	0,98	0,98	0,99	0,98	0,97	0,96	0,94	0,91	0,88	0,85	0,82	0,78
50	0,77	0,81	0,85	0,88	0,91	0,94	0,96	0,96	0,97	0,97	0,96	0,96	0,95	0,92	0,89	0,87	0,83	0,80	0,76

MERE ZA INTEGRACIJU FOTONAPONSKIH SISTEMA U KROVOVE ŠKOLSKIH OBJEKATA U SRBIJI

Prema anketama koje su sprovedene zaključuje se da svega nekoliko škola u Srbiji ima instalisane fotonaponske sisteme na svojim krovovima. Pošto se radi o zanemarljivom broju škola, za postojeće stanje može se pretpostaviti da ne postoje instalirani fotonaponski sistemi u školskim objektima u Srbiji.

Prvo unapređenje podrazumeva izgradnju fotonaponskih sistema na raspoloživim krovnim površinama koje imaju najbolju prostornu orijentaciju sa aspekta ukupne godišnje insolacije.

Instalisana snaga FN sistema treba da obezbedi godišnju proizvodnju električne energije koja pokriva do 50% ukupne godišnje potrošnje električne energije u analiziranom školskom objektu. Raspoložive površine su po predpostavci ravne površine krovova, kao i kose krovne površine čija je orijentacija u granicama $\pm 90^\circ$ u odnosu na jug. Biće pretpostavljeno da se može prekriti fotonaponskim panelima maksimalno 90% ovih krovnih površina.

Drugo unapređenje podrazumeva izgradnju fotonaponskih sistema na raspoloživim krovnim površinama koje imaju najbolju prostornu orijentaciju sa aspekta ukupne godišnje insolacije.

Instalisana snaga FN sistema treba da obezbedi godišnju proizvodnju električne energije koja pokriva 100% ukupne godišnje potrošnje električne energije u analiziranom školskom objektu. Ukoliko ukupna raspoloživa krovna površina objekta ne može obezbediti dovoljnu instalisanu snagu fotonaponskih panela za pokrivanje 100% godišnje potrošnje električne energije objekta, onda ova mera podrazumeva instalaciju FN sistema na celoj raspoloživoj krovnoj površini. Raspoložive površine su po predpostavci ravne površine krovova, kao i kose krovne površine čija je orijentacija u granicama $\pm 90^\circ$ u odnosu na jug. Biće pretpostavljeno da se može prekriti fotonaponskim panelima maksimalno 90% ovih krovnih površina.

Prema nacionalnoj tipologiji školskih objekata u Republici Srbiji definisani su tipovi i podtipovi škola. Tipologija nije obuhvatila parametre koji su bitni za izgradnju fotonaponskih sistema, tako da se ne može uzeti kao reprezentativna za sagledavanje pogodnosti i kapaciteta školskih objekata u pogledu integracije fotonaponskih sistema [3,4].

U tabeli 3 prikazani su geometrijski elementi bitni za sagledavanje kapaciteta za izgradnju fotonaponskih sistema na

tipovima škola definisanih u nacionalnoj tipologiji. Tabela je proširena sa tri sportske školske sale.

Tabela 3. Geometrijski elementi bitni za sagledavanje kapaciteta za izgradnju fotonaponskih sistema na tipovima škola definisanih u nacionalnoj tipologiji proširenoj sa tri sale [3,4]

ŠKOLE	Ukupna površina kosog krova [m ²]	Nagibn i ugao	Površni na ravnog krova [m ²]	Površine kosog krova [m ²] i njihove orijentacije				
				E	SE	S	SW	W
A1	325	30°		47,5		115		47,5
A2	768	35°			266		94	
A2pt	2095	35°		1095		50		900
A3	890	42°			293		152	
A3pt	1300	35°		425		212		425
B1	189	42°				93		
B2	515	6°					280	
B3	300	10°	581	150				150
C1	211	30°					70	
C2	214	30°	505	140				74
C3	1790	18°				531		
C3pt			1615					
D3			1760					
SALE								
01			371					
02	972	24° (W) 16° (E)		731				214
03	538	6°	260		269		269	

U tabeli 4. prikazani su osnovni parametri efekata izgradnje fotonaponskih sistema na odabranim školskim objektima i sportskim salama prema **unapređenju 1**. Podaci o ukupnoj potrošnji električne energije školskih objekata su dobijeni anketiranjem, osim za škole A2, B1, B2, C1, C3 i D3, koje ovaj podatak nisu dale ili je podatak bio nelogičan. Za ove škole procena godišnje potrošnje električne energije je izvršena na osnovu prosečne specifične potrošnje električne energije u školama u Republici Srbiji, koja iznosi 16,36 kWh/m². Svi proračuni su rađeni sa pretpostavkom da se škole nalaze u regionu Beograda. Ukupni investicioni troškovi se odnose na projektovanje, kupovinu opreme, izradu noseće konstrukcije i izgradnju fotonaponskih panela.

Može se zaključiti da na svim školskim objektima postoji mogućnost instalacija fotonaponskih panela koji bi u potpunosti pokrili polovinu ukupne godišnje potrošnje električne energije školskih objekata i sala. Treba istaći da su dijagrami potrošnje električne energije i proizvodnje fotonaponskih panela u ovakvim objektima slabo korelisani kako na sezonskom, tako i na dnevnom nivou.

Tabela 4. Osnovni parametri efekata izgradnje fotonaponskih (FN) sistema na odabranim školskim objektima i sportskih sala prema **unapređenju 1** [5]

SKOLE	Ukupna neto površina (m ²)	Ukupna godišnja potrošnja električne energije (MWh/god)	Ukupna instalisana snaga FN sistema na krovu objekta (kW _p)	Godišnja proizvodnja električne energije FN sistema (MWh/god)	Ukupna investicija za izgradnju FN sistema (Euro)	Smanjenje emisije CO ₂ (tona/god)
A1	260	8,4	3,7	4,2	3700	9,114
A2	675	20,3	9,4	10,2	9400	22,026
A2pt	1055	17,3	7,6	8,7	7600	18,771
A3	2115	57,4	26,5	28,7	25200	62,279
A3pt	2305	40,0	17,5	20,0	17500	43,400
B1	145	2,4	1,1	1,2	1100	2,604
B2	840	13,8	6,1	6,9	6100	14,973
B3	1990	48,8	21,3	24,4	20200	52,948
C1	185	3,0	1,4	1,5	1400	3,255
C2	990	33,6	14,7	16,8	14700	36,456
C3	2765	45,3	20,2	22,7	19200	49,151
C3pt	3765	48,0	21,0	24,0	19900	52,080
D3	4600	75,3	32,9	37,7	31200	81,701
SALE						
01	330	5,4	2,4	2,7	2400	2,930
02	864	18,7	9,6	9,4	9600	10,145
03	707	15,3	6,7	7,7	6700	8,301

U tabeli 5. prikazani su osnovni parametri efekata izgradnje fotonaponskih sistema na odabranim školskim objektima i salama prema **unapređenju 2**. Svi proračuni su rađeni sa pretpostavkom da se škole nalaze u regionu Beograda. Ukupni investicioni troškovi se odnose na projektovanje, kupovinu opreme, izradu noseće konstrukcije i izgradnju fotonaponskih panela.

Tabela 5. Osnovni parametri efekata izgradnje fotonaponskih (FN) sistema na odabranim školskim objektima i sportskim salama prema **unapređenju 2** [5]

ŠKOLE	Ukupna neto površina (m ²)	Ukupna godišnja potrošnja električne energije (MWh/god)	Ukupna instalisana snaga FN sistema na krovu objekta (kW _p)	Godišnja proizvodnja električne energije FN sistema (MWh/god)	Ukupna investicija za izgradnju FN sistema (Euro)	Smanjenje emisije CO ₂ (tona/god)
A1	260	8,4	7,5	8,4	7500	9,114
A2	675	20,3	18,7	20,3	18700	22,026
A2pt	1055	17,3	16,5	17,3	16500	18,771
A3	2115	57,4	52,7	57,4	47400	62,279
A3pt	2305	40,0	35,0	40,0	33200	43,400
B1	145	2,4	2,2	2,4	2200	2,604
B2	840	13,8	12,1	13,8	12100	14,973
B3	1990	48,8	42,6	48,8	40400	52,948
C1	185	3,0	2,8	3,0	2800	3,255
C2	990	33,6	29,3	33,6	27800	36,456
C3	2765	45,3	40,3	45,3	38300	49,151
C3pt	3765	48,0	41,9	48,0	39800	52,080
D3	4600	75,3	65,8	75,3	59200	81,701
SALE						
01	330	5,4	4,7	5,4	4700	5,859
02	864	18,7	19,2	18,7	19200	20,289
03	707	15,3	13,4	15,3	13400	16,601

Može se zaključiti da na svim školskim objektima postoji mogućnost instalacija fotonaponskih panela koji bi u potpunosti pokrili godišnju potrošnju električne energije školskog objekta i sala. Treba istaći da su dijagrami potrošnje električne energije i proizvodnje fotonaponskih panela u ovakvim objektima slabo korelisani kako na sezonskom, tako i na dnevnom nivou.

PROCENA EFEKATA IZGRADNJE FOTONAPONSKIH SISTEMA NA ŠKOLSKIM OBJEKTIMA NA NIVOU SRBIJE

Na osnovu proračuna proizvodnje fotonaponskih sistema na krovovima tipskih školskih objekata izvršena je procena efekata izgradnje fotonaponskih sistema na nivou svih školskih objekata u Srbiji. S obzirom da nisu bili dostupni statistički podaci o geometrijskim elementima i raspoloživim površinama za krovove školskih objekata, procene proizvodnje su izvršene uz uvažavanje sledećih pretpostavki:

- *Raspoložive površine i nagibni uglovi krovova svih objekata u okviru jedne kategorije su isti;*
- *Solarni potencijal na prosečnom školskom objektu u Srbiji iznosi 3,6 kWh/m²/dan na horizontalnoj površini;*
- *Orijentacija krovova školskih objekata sa kosim krovovima može biti podjednako verovatna za svaki pravac.*

Pored navedenih pretpostavki, usvojeno je da je fotonaponske panele pogodno postaviti na 80% objekata u svakoj od kategorija definisanih nacionalnom tipologijom. Preostalih 20 % objekata se smatra nepogodnim za instalaciju fotonaponskih sistema zbog neraspoloživosti krovne površine, kompleksne geometrije ili prisustva senke od okolnih objekata.

U tabeli 6. dati su podaci proračuna efekata instalacije fotonaponskih sistema na školskim objektima u Srbiji nakon primene mere **unapređenja 1**, a u tabeli 7. nakon primene mera **unapređenja 2**.

Tabela 6. Osnovni parametri efekata izgradnje fotonaponskih (FN) sistema na školskim objektima u Srbiji prema **unapređenju 1**[5]

TIP ŠKOLE	Broj škola	Ukupna godišnja potrošnja električne energije (GWh/god)	Ukupna instalirana snaga FN sistema na krovovima objekata (MW _p)	Godišnja proizvodnja električne energije FN sistema (GWh/god)	Ukupna investicija za izgradnju FN sistema (Milion Eura)	Smanjenje emisije CO ₂ (tona/god)
A1	596	5,0	2,07	2,3	1,97	2489
A2	300	6,1	2,52	2,8	2,39	3030
A3	242	3,9	1,62	1,8	1,54	1948
B1	664	1,6	0,63	0,7	0,60	758
B2	449	6,2	2,52	2,8	2,39	3030
B3	538	26,3	10,61	11,8	10,08	12771
C1	337	1,0	0,45	0,5	0,43	541
C2	274	9,2	3,78	4,2	3,59	4546
C3	413	18,7	7,55	8,4	7,17	9091
D3	77	5,8	2,34	2,6	2,22	2814
Ukupno	3890	84	34	38	32	41018

Tabela 7. Osnovni parametri efekata izgradnje fotonaponskih (FN) sistema na školskim objektima u Srbiji prema **unapređenju 2** [5]

TIP ŠKOLE	Broj škola	Ukupna godišnja potrošnja električne energije (GWh/god)	Ukupna instalirana snaga FN sistema na krovovima objekata (MW _p)	Godišnja proizvodnja električne energije FN sistema (GWh/god)	Ukupna investicija za izgradnju FN sistema (Milion Eura)	Smanjenje emisije CO ₂ (tona/god)
A1	596	5,0	3,67	4,0	3,30	4330
A2	300	6,1	4,50	4,9	4,05	5300
A3	242	3,9	2,85	3,1	2,57	3360
B1	664	1,6	1,19	1,3	1,07	1410
B2	449	6,2	4,59	5,0	4,13	5410
B3	538	26,3	19,36	21,1	17,42	22840
C1	337	1,0	0,73	0,8	0,66	0870
C2	274	9,2	6,79	7,4	6,11	8010
C3	413	18,7	13,77	15,0	12,39	16240
D3	77	5,8	4,31	4,7	3,88	5090
Ukupno	3890	84	62	67	56	72860

ZAKLJUČAK

Izgradnja fotonaponskih sistema predstavlja značajnu investiciju s obzirom na cenu koštanja komponenti ovog sistema. Sa druge strane, prednost FN sistema je što su oni modularni, tako da je moguća njihova fazna izgradnja, odnosno proširivanje kapaciteta. Krovovi škola često imaju površine različite orijentacije i nagiba, pa izgradnja fotonaponskih sistema na svim površinama nema iste energetske i ekonomske pokazatelje. Iz tog razloga prioritet izgradnje imaju površine sa najboljom godišnjom inosolacijom, koje će obezbediti najbrži povraćaj investicije i najveću specifičnu proizvodnju energije.

Potencijal za izgradnju fotonaponskog panela na raspoloživoj krovnoj površini prosečnog školskog objekata višestruko prevazilazi godišnje potrebe za električnom energijom školskog objekta. Predložene mere integracije fotonaponskih sistema u krovove školskih objekata su orijentisane ka pokrivanju dela ili celokupne potrošnje električne energije ovih objekata iz ovog obnovljivog izvora. Zbog loše sezonske i dnevne korelisanosti potreba za električnom energijom i proizvodnjom energije fotonaponskih panela, pokrivanje potrošnje se može posmatrati samo kroz godišnji energetski bilans. Pri definisanju potrebnih instaliranih snaga fotonaponskih sistema za postizanje zadatih mera pretpostavljeno je postojeće stanje u pogledu potrošnje električne energije školskih objekata. Sprovedenjem mera unapređenja energetske efikasnosti, potrebe za električnom energijom će biti smanjene, tako da bi i potrebe za instaliranim fotonaponskim sistemima bile proporcionalno smanjene.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je realizovan u okviru istraživanja na projektu finansiranog od strane Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, kao i u okviru istraživanja na projektu, "Inteligentne energetske mreže", br. III 42009 koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

REFERENCE

- [1] <https://solargis.com/>
- [2] M. Forcan, Ž. Đurišić, J. Mikulović (2016) An algorithm for elimination of partial shading effect based on a Theory of Reference PV String, Solar Energy 132, pp. 51–63
- [3] Jovanović Popović M., Ignjatović D., Rajčić A., Đukanović L.J., Nedić M., Stanković B., Čuković, Ignjatović N., Živković B., Sretenović A., Đurišić Ž., Kotur D. (2018) Zgrade školskih i predškolskih ustanova – metodološki okvir formiranja tipologije i poboljšanja energetske efikasnosti / School and Kindergarten Buildings / A methodological framework for the formulation of typology and the improvement of energy efficiency, Beograd: GIZ-Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GIZ GmbH, (dvojezično izdanje) ISBN 978-86-80390-28-4, COBISS SR-ID 270972428, 97str, dostupno na: <http://eplatforma>.

- [4] Jovanović Popović M., Ignjatović D., Rajčić A., Đukanović L.J., Nedić M., Stanković B., Čuković Ignjatović N., Živković B., Sretenović A., Đurišić Ž., Kotur D. (2018) Nacionalna Tipologija Školskih zgrada Srbije/National Typology of School Buildings in Serbia, Beograd: GIZ-Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH dvojezično izdanje) ISBN 978-86-80390-29-1, COBISS SR-ID 270974732, 261 str. dostupno na: <http://eplatforma>
- [5] Jovanović Popović M., Ignjatović D., Zeković B., Đurišić Ž., Batić I., Bakić V., Mirkov N., Kljajić M., Konstantinović D. (2019) Primena obnovljivih izvora energije na zgradama škola, fiskulturnih sala i predškolskih ustanova, Application of renewable energy sources in school, gym and kindergarten buildings, GIZ-Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, (dvojezično izdanje) ISBN 978-86-80390-33-8, GIZ COBISS.SR-ID 278108172

AUTORI

Dr Iva Batić – naučni saradnik, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, iva@etf.rs

Dr Željko Đurišić – vanredni profesor, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, djurisic@etf.rs