



UNIVERZITET U BANJOJ LUCI
ARHITEKTONSKO-GRAĐEVINSKO-
GEODETSKI FAKULTET



mr Vesna Z. Trifunović-Dragišić

MATERIJALIZACIJA FASADA NISKO-ENERGETSKIH OBJEKATA

DOKTORSKA DISERTACIJA

Banja Luka, 2019. godina



UNIVERSITY OF BANJA LUKA
**FACULTY OF ARCHITECTURE, CIVIL
ENGINEERING AND GEODESY**



Vesna Z.Trifunović-Dragišić, M.Sc.

MATERIALIZATION OF THE ENVELOPE OF LOW ENERGY BUILDINGS

DOCTORATE DISSERTATION

Banja Luka, 2019.

*Ovu doktorsku disertaciju želim da posvetim svojim nesebičnim i požrtvovanim roditeljima **Verici i Zoranu Trifunović**, svom suprugu **Željku i deci**, koji su me nesebično podržavali.*

*Zahvaljujem se mentoru, profesoru **Milenku Stankoviću**, koji je svojim sugestijama, ali i kritikama i pohvalama, bodrio da u teškim trenucima ovo istraživanje završim. Zahvalnost dugujem i profesoru **Predragu Osmokroviću** na velikoj pomoći i nesebičnoj podršci.*

***Moja porodica** i njihovo razumevanje su mnogo doprineli da završim ovu doktorsku disertaciju.*

PODACI O MENTORU I DISERTACIJI

Mentor: dr Milenko Stanković, redovni profesor,
Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet,
Univerzitet u Banjoj Luci,

Naziv teme: Materijalizacija fasada nisko-energetskih
objekata

Rezime

Cilj rada je bio da se ispita energetska, ekološka i ekonomska opravdanost materijalizacije fasada nisko-energetskih objekata, fotonaponskim solarnim panelima. Na osnovu postavljenih hipoteza, korišćenjem solarne energije u objektima mogu se dobiti pogodnosti u vidu smanjenja i uštede potrošnje konvencionalnih vidova energije, kao i povećanje komfora stanovanja. Obezbeđivanjem paralelnih energetskih sistema, nezavisnih od distributivne mreže, u vidu solarnih panela, moguće je obezbediti funkcionisanje objekata u uslovima ispada iz distributivnog sistema, ali i dopunsko snabdevanje u normalnim uslovima. Ovi paralelni energetski sistemi su pogodni za urbane sredine, kao mere rešavanja klimatskih promena, u proizvodnji električne, mehaničke i toplotne energije, ali i kao deo obnovljivih izvora energije, jer su zbog svoje prirode neiscrpni. Prema svojoj standardnoj konstrukciji predstavljaju dodatnu termičku izolaciju objekta i koncipirani su tako da se ne zagrevaju i ne propuštaju toplotu ni u jednom pravcu. U disertaciji su odabrana četiri karakteristična nisko-energetska objekta i urađena detaljna analiza prema bioklimatskim i geoprostornim parametrima. Analiziran je proces fotonaponske konverzije energije i izbor tipova solarnih ćelija po efikasnosti, ceni i trajnosti. Korišćene su računarske simulacije u procesu projektovanja i dimenzionisanja fotonaponskih solarnih panela, u realnim uslovima različitih bioklimatskih i geoprostornih parametara, integrisanih u fasade nisko-energetskih objekata, metodom matematičke statistike (zakon porasta verovatnoće, da bi se izbegla netačnost) uz odgovarajuću softversku podršku, i dimenzionisani su eksperimentalno dobijeni rezultati konačne materijalizacije fasade nisko-energetskih objekata fotonaponskim panelima. Izvršeno je koncipiranje eksperimentalnog postupka male merne nesigurnosti i autonomnog sistema merenja prikupljanja i obrade rezultata. Dobijeni rezultati na nisko-energetskim objektima, raspoređenim na četiri lokacije u Beogradu, su stohastičke prirode i prikupljeni su u vremenskom periodu od godinu dana. Eksperimentalno istraživanje (softverskim paketom sračunate dobijene vrednosti snage solarnih panela), pokazalo je da se može obezbediti dodatna električna snaga koja utiče na normalno i komforno stanovanje i na ekonomsko-energetski bilans objekata. Kako je fotonaponska konverzija energije ekološki preporučljiva, može se zaključiti da je ovakva materijalizacija fasada nisko-energetskih objekata preporučljiva. Međutim, postavlja se pitanje ekonomske isplativosti ovakvih sistema za snabdevanje (dopunsko ili u celosti) električnom energijom. U cilju provere ekonomičnosti solarnog sistema, na osnovu eksperimenata vršenih u razumnom roku, koja najviše zavisi od veka trajanja ugrađenih panela, primenjene su sofisticirane nuklearne metode ubrzanog

starenja solarnih panela, pošto bi ispitivanje i procena veka trajanja solarnih panela bili vremenski krajnje neekonomični. Tokom eksperimentalnog postupka, korišćeni su profesionalni modeli solarnih ćelija koji su pokrivali znatno manju površinu fasada objekata radi dobijanja zaključaka o građevinskim i energetske efekta materijalizacije fasade integrisanjem fotonaponskih solarnih panela. U punoj dimenziji objekata, primenjivan je statistički zakon porasta verovatnoće, podizan u tu svrhu i napisan softverskim paketom. Nakon izvršenih laboratorijskih merenja, pod dobro kontrolisanim uslovima uspostavljena je jednoznačna korelacija između efekta stvarnog starenja i ubrzanog starenja, pa je bilo moguće proceniti ekonomsku isplativost integracije fotonaponskih sistema u materijalizaciji objekta. Ustanovljeno je da je ovako dobijena električna energija, korisnicima, oko četiri puta skuplja od energije koje mogu da preuzimaju iz niskonaponske distributivne mreže (koja je u urbanim sredinama svima dostupna). Dobijeni rezultati ukazuju da bi se objekti na kojima je izvršena materijalizacija fasada fotonaponskim panelima mogli šire koristiti i to dvosmerno. Odnosno, kada fotonaponski paneli proizvode više snage nego što objekat troši, da se taj višak aktivne snage ubaci u niskonaponsku mrežu, a kada objekat troši veću snagu nego što integrisani sistem proizvodi, da se dodatna snaga preuzme iz niskonaponske distributivne mreže. Ipak, treba napomenuti da bi subvencijama, ili na neki drugi način, država trebalo da učestvuje u materijalizaciji fotonaponskih sistema fasada objekata uopšte, jer se u današnjoj situaciji teško može očekivati da bi vlasnici objekata bili zainteresovani za ulaganja u takvu materijalizaciju objekata. S tim u vezi, usvojen je Zakon o energetici (Sl. glasnik RS, br. 57/2011, 80/2011) koji prepoznaje značaj obnovljivih izvora energije i definiše energetske politiku Srbije u smislu stvaranja povoljnijih uslova za proizvodnju energije iz OIE. Pored unapređenja finansija, privrede i ekonomije, “Zakon o energetici” definiše i razvoj proizvodnje električne energije kombinovan s toplotnom energijom.

Ključne reči: materijalizacija nisko-energetski objekat, solarna ćelija, fotonaponski (FN) sistem, ekonomičnost, vek trajanja solarne ćelije, starenje solarne ćelije

Naučna oblast: (5) inženjerstvo, tehnologija i građevinarstvo

Naučno polje: (53) arhitektura i građevinarstvo

Klasifikaciona oznaka: T 230

Tip odabrane licence Kreativne zajednice

(Creative Commons): Autorstvo nekomercijalo (CC BY-NC)

MENTOR AND DISSERTATION INFORMATION

Menthor: dr Milenko Stankovic, PhD full professor,
Faculty of Architecture, Civil engineering and Geodesy
University of Banja Luka

Title of Doctoral

Dissertation: Materialization of the envelope of low-energy buildings

Abstract

The aim of the paper was to examine the energy, ecological and economic justification for materializing the facades of low-energy facilities by photovoltaic solar panels. On the basis of the hypotheses that by using solar energy in buildings, benefits can be gained in terms of reducing and saving consumption of conventional types of energy and of increasing the comfort of housing. By providing parallel power systems, independent of the distribution network, in the form of solar panels, it is possible to ensure the facilities to function in the conditions when they fall out of the distribution system, but also to supply them with additional energy under normal conditions. These parallel energy systems are suitable in urban environments, as climate change mitigation measures, in the production of electrical, mechanical and thermal energy but also as part of renewable energy sources because, due to their nature, they are inexhaustible. According to their standard construction, they are additional thermal insulation of the building, designed so that they are not heated and do not drop heat in any directions. In the dissertation, four characteristic low-energy buildings were chosen and detailed analysis, according to bioclimatic and geospatial parameters, was done. The process of photovoltaic conversion of energy and the choice of types of solar cells by efficiency, price and durability was analysed. Computer simulations were used in the process of designing and dimensioning photovoltaic solar panels in real conditions of various bioclimatic and geospatial parameters, integrated in the facades of low-energy facilities by the method of mathematical statistics (i.e. law of increasing probability, in order to avoid inaccuracy), with corresponding software support and the experimentally obtained results of the final materialization of the facade of low-energy facilities by photovoltaic panels were dimensioned. The experimental procedure of small uncertainty and an autonomous system of measurement, collection and processing of results was conceived. The results obtained at low-energy facilities, situated at four locations in Belgrade, are stochastic in nature and were collected over a period of one year. Experimental research (obtained power values of solar panels calculated by the software package) has shown that additional electric power can be provided, which affects normal and comfortable housing as well as economic and energy balance of facilities. Since photovoltaic energy conversion is ecologically recommended, it can be concluded that this materialization of the facades of low-energy facilities is recommended. However, the question of the economic cost-effectiveness of such (supplementary or in full) electricity supply systems is raised. In order to check the economics of the solar system based on experiments carried out within a reasonable time, which mostly depends on the lifetime of the built-in panels, sophisticated nuclear methods of accelerated aging of solar panels were applied, since the examination and estimation of the lifetime of solar panels would be extremely uneconomical. During the experimental procedure, professional models of solar cells were used, which covered a much smaller surface of the façade of buildings, in order to obtain conclusions about the construction and energy effects of façade materialization by integrating photovoltaic solar panels. In the full

dimension of facilities, the statistical law of increasing probability was applied, raised for this purpose and written by a software package. After performed laboratory measurements, under well-controlled conditions, unambiguous correlation between the effect of real aging and accelerated aging was established, so it was possible to assess the economic cost-effectiveness of the integration of photovoltaic systems into the materialization of the building. It has been determined that the electricity received in this way is about four times more expensive for consumers than the energy they can take from the low-voltage distribution network (which is available in all urban areas). The obtained results indicate that the facilities on which the materialization of the façade with photovoltaic panels has been performed, could be widely used in two ways. That is, when photovoltaic panels generate more power than the facility consumes, this excess of power is inserted into the low-voltage network, and when the facility consumes more power than the integrated system produces, additional power is taken from the low-voltage distribution network. However, it should be noted that by subsidies or in some other way the state should participate in the materialization of photovoltaic systems in facades of buildings in general, because in today's situation it can hardly be expected that the owners of the facilities would be interested in investing in such materialization of buildings. In this regard, the Law on Energy (*Official Gazette* of the Republic of Serbia, no. 57/2011, 80/2011), that recognizes the importance of renewable energy sources, was adopted and it defines Serbia's energy policy in terms of creating economic and financial conditions for the production of energy from RES and for combined electricity and heat production.

Key words: materialization, envelope of low-energy building, solar cell, photovoltaic (PV) system, efficiency, the duration of the solar cell, the solar cell aging

Scientific area: (5) Engineering, Technology and Construction

Scientific field: (53) Architecture/Civil Engineering

Classification mark: T 230

Creative Commons: (CC BY-NC)

LISTA KORIŠĆENIH SKRAĆENICA

(po redosledu u ovoj disertaciji)

OIE	obnovljivi izvor energije
FN	fotonapon
SiO ₂	silicijum
N-tip	poluprovodnik
R-tip	poluprovodnik
E_c	energija dna provodne zone
E_d	vrednost energije donorskog nivoa
E_a	vrednost energije akceptorskog nivoa
E_v	vrednost energije vrha valentne zone
$E(\vec{k})$	energetske zone elektrona u kristalu u faznom prostoru
$\epsilon\omega$	apsorbujući foton energije
E_g	vrednost energetskog procepa između provodne i valentne zone
Back Scattered Field	površinsko povratno polje
MINP	metal-izolatorske, p-n spojne (MINP) solarne ćelije
HIT ćelije	heterospoj sa tankim „i“ spojevima ćelije
DLD	lokalni sloj defekta
SODL	preko silicijuma na sloju defekta
HEM	metoda toplotne zamene
edge-fed, EFG	film zasićenih ivica
PESC	solarne ćelije sa pasivno emitujućom strukturom
a-Si:H	tankoslojni amorfni silicijum
μ c-Si:H	tankoslojni mikrokristalni (μ c-Si:H) silicijum
N ⁺ -P	najčešća struktura homospojne silicijumske solarne ćelije
J_{sc}	površinska gustina struje kratkog spoja
V_{OC}	napon otvorenog kola
I-V	krive, karakteristike solarnih ćelija

J_o	gustina struje zasićenja
R_s	redna otpornost
J_L	fotogenerisana struja
V	primenjeni napon
n	faktor idealnosti
k	Bolzmanova konstanta
q	elementarno naelektrisanje
T	temperatura
$J_{o1} \ J_{on}$	gustine struje zasićenja za $n = 1$ i $n > 1$, respektivno
$R_s \ R_{sh}$	redna i paralelna otpornost, respektivno
$F(\lambda)$	broj upadnih fotona po jedinici površine u jedinici vremena u jediničnoj širini zone
$SR(\lambda)$	spektralni odziv
N_A	koncentracija akceptora u bazi
E_g	energetski procep
$(P^+ - i - N^+)$	pojedine konfiguracije solarnih ćelija
J_{02}	struja mraka
P_m	maksimalna snaga uređaja
P_s	ukupna uložena snaga
ff	faktor ispune
V_m	maksimalni napon datog uređaja
η	sposobnost solarne ćelije za pretvaranje dela sunčeve energije u električnu u zavisnosti od mnogih fundamentalnih i tehnoloških faktora
h_ν	fotoni
r	uticaj redne otpornosti
X	zraci potiču iz atomskog omotača
γ	zraci potiču iz jezgra
(n, α) reakcija	reakcija neutronske sudara kod kojih jezgro atoma apsorbira neutron nakon čega se emituje naelektrisana čestica
(n, p) reakcija	reakcija neutronske sudara kod kojih jezgro atoma apsorbira neutron nakon čega se emituje naelektrisana čestica
dE	inkrementalni gubitak energije
dx	inkrementalna dužina putanje neutrona

$\frac{dE}{dx}$	zaustavna moć kod neutronske jonizacije
N	broj atoma silicijuma po kubnom centrimetru
$\sigma_j(E)$	presek neutronske sudara kojim se predaje energija E uzmaknutoj, ili rezultujućoj čestici koja odgovara j -tom tipu jonizujućeg procesa
$f_j(E)$	deo energije čestice koji se utroši u j -tom tipu jonizujućeg procesa
$\phi(t)$	upadni fluks
τ_i	vreme života manjinskih nosilaca pre ozračivanja
t_p	perioda pulsa mereno od uzlazne ivice
$K \text{ (s} \cdot \text{cm}^{-2})$	konstanta oštećenja.
E_{KV}	energetsko stanje defektnog kompleksa kiseonik-vakancija
$\delta\sigma$	razlika između vrednosti provodljivosti σ pre i posle ozračivanja
σ	provodljivost
δn i δp	koncentracije viška nosilaca
p_n	prosečna koncentracija manjinskih nosilaca ispod površine
N_C	koncentracija podpovršinskih rekombinacionih centara
σ_p	verovatnoća rekombinacije (poprečni presek) po nosiocu
l_s	debljina podpovršinskog sloja
v_t	termalna brzina nosilaca
$D_p(\partial p_n / \partial x) _{x=0}$	dotok manjinskih nosilaca u podpovršinski sloj
S_p	brzina površinske rekombinacije
$N_S = N_C l_s$	površinski sloj rekombinacionih centara ispod površine
n_s i p_s	koncentracije elektrona i šupljina na površini
S_{p0}	brzina površinske rekombinacije u odsustvu površinskog tovara
U_s	dotok manjinskih nosilaca koji stižu do površine
N_D	koncentracija donora
I_S	struja zasićenja (klasičnog p-n spoja)
<i>Shockley</i>	idealni slučaj transporta slobodnih nosilaca
<i>Auger</i>	slučaju <i>Auger</i> —ove rekombinacije u uslovima visokog nivoa injekcije kada je faktor idealnosti $n = 2/3$
E_∞	konstanta materijala koja je u vezi sa transmisijom barijere za nosioce energije $E = 0$

N_d	koncentracija dopiranja
m^*	efektivna masa elektrona
$\mathcal{E}_s$	propustljivost
A^{**}	Ričardsonova konstanta, u opštem slučaju zavisi od primenjenog napona
$\emptyset_B$	kod realnih struktura, zavisnost visine barijere od izlaznog rada metala i elektronskog afiniteta poluprovodnika
$\emptyset_{BO}$	asimptotska vrednost visine barijere kada je polje jednako 0
Shockley-Read-Hall (SRH)	rekombinacija u osiromašenoj oblasti (preko energetskih nivoa defekata u energetskom procepu).
MIS	dioda
$\ln I-V$	grafik polu-logaritamske zavisnosti karakteristika solarne ćelije
LED	dioda
MOS	dioda
SOS	dioda
$\Delta\phi_B^i(U) = \phi_B^j(U) - \phi_{BO}^j$	razlika između visine barijere određene I-V merenjima i ekstrapolirane visine barijere za nulti primenjeni napon
ρ_1	koeficijent veći od nule, koji zavisi od temperature
ρ_2	koeficijent koji ne zavisi od temperature, koeficijent ρ_2 je vezan za sniženje srednje visine barijere
ρ_3	koeficijent koji ne zavisi od temperature, a ρ_3 je u vezi sa sužavanjem Gausove raspodele barijere kada se dovede spoljašnji napon
T_0	temperaturski ekvivalent koeficijenta ρ_3
n_{lok}	lokalni faktor idealnosti
ΔI_F	Zavisnost amplitude praskavog šuma, odnosno prekomerne struje
V_F	primenjeni napon
ΔI_{sat}	struja zasićenja
n_{BN}	faktor idealnosti
FET	uređaj, kod kog se smatra da se niskovrekventni šum pojavljuje u unutrašnjosti materijala
MOST	uređaj, kod kog centri zamki u oksidnom međupovršinskom sloju dominiraju nad zamkama u unutrašnjosti uzorka
$\ln 2$	Srednja vrednost kvadrata sačminskog šuma
I	struja uređaja
Δf	širina frekventne zone

g	transkonduktansa uređaja
$\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0}$	smanjenje vremena života manjinskih nosilaca tokom ozračivanja
τ_0 i τ	vremena života nosilaca pre i posle ozračivanja, respektivno
ϕ	fluks zračenja
K_τ	konstantna oštećenja
L	difuzna dužina povezana sa vremenom života nosilaca
D	difuzionu konstantu
I_{tn}	tunelovanje kroz međusloj – strujno naponska karakteristika
V_A	spoljni napon
I_E	eksperimentalno merena struja diode
m	broj eksperimentalno određenih parova podataka (V_E, I_E)
$F(V, I)$	polazna pomoćna funkcija koju je predložio Norde za određivanje parametara dioda iz podataka dobijenih I-V merenjima
$G_V(V, I)$	poboljšanje Norde-ove metode
$G = dI/dV$	diferencijalna provodnost realne diode predstavlja takozvanu krivu A u <i>Werner</i> -ovom modelu
R_{ex}	spoljna otpornost
Weibull-ova raspodela	empirijska funkcija raspodele vremena minimalnog napona se dobija obnavljanjem ispitivanja i pogodno se opisuje <i>Weibull</i> -ovom raspodelom: $F(t_d; u_{m1})$
u_{mp}	karakteristika veka trajanja solarnih ćelija
k_{mp}	konstanta koja karakteriše geometriju strukture
r	eksponent veka trajanja koji uglavnom zavisi od primenjenog materijala i statističkih fluktuacija tokom tehnološkog procesa

SADRŽAJ

POGLAVLJE 1

UVODNA RAZMATRANJA	1
1.1. Prethodna analiza informacija o motivu, sadržaju i problemu istraživanja	1
1.2. Predmet i obuhvat istraživanja	6
1.3. Ciljevi i zadaci istraživanja.....	7
1.4. Polazne hipoteze u istraživanju.....	7
1.5. Naučne metode istraživanja	8
1.6. Generalna struktura provedenih istraživanja	10
1.7. Naučna opravdanost i očekivani rezultati provedenih istraživanja	12

POGLAVLJE 2

PRIMENA FOTONAPONSKIH (FN) SISTEMA NA ZGRADAMA U URBANIM SREDINAMA U EVROPSKOJ UNIJI I U SRBIJI	14
2.1. Uvod	14
2.2. Primena solarnih sistema	15
2.3. Primena fotonaponskih (FN) sistema u gradovima EU	16
2.4. Primeri dobre prakse primene solarnih FN sistema u gradovima EU	18
2.4.1. Fotonaponski (FN) sistemi u urbanim politikama (PV-UP-SCALE)	18
2.4.1.1. Studija slučaja-Stambeni objekti za solarnu energiju u Severnoj Rajni-Vestfaliji (NRW)	19
2.4.2. Program IEA PVPS (IEA Photovoltaic Power System Program (PVPS))	21
2.4.2.1. Projekat solarnog stambenog kompleksa „Pal Town Josai-no-Mori”, u Ota City, Gunma Prefekturi u Japanu (IEA-PVPS-Task 10)	22
2.4.2.2. Projekat solarnog stambenog kompleksa La Darnaise, Grand-Lyon konurbacije u Francuskoj, (IEA-PVPS-Task 10)	24

2.5. Elektroenergetika i iskorišćenost obnovljivih izvora energije u Republici Srbiji	26
2.6. Parametri bitni za projektovanje objekata zasnovani na principima bioklimatske arhitekture	29
2.6.1. Odabir lokacije	29
2.6.2. Konfiguracija terena	31
2.6.3. Orijentacija	32
2.6.4. Izloženost vetru	33
2.6.5. Vegetacija	34

POGLAVLJE 3

STRUKTURA POLUPROVODNIČKIH SOLARNIH KOMPONENATA ZA FOTONAPONSKU (FN) KONVERZIJU	37
3.1. Uvod	37
3.2. Karakteristike poluprovodničkih materijala	39
3.3. Principi rada i osnovne izlazne karakteristike fotonaponske solarne ćelije	41
3.3.1. Istorija fotonaponske konverzije	41
3.3.2. Princip rada silicijumske solarne ćelije	41
3.3.3. Zavisnost struje kratkog spoja i napona otvorenog kola solarne ćelije od osnovnih fizičkih parametara	46
3.3.3.1. Gustina struje kratkog spoja (J_{sc}) solarne ćelije	47
3.3.3.2. Zavisnost napona otvorenog kola (V_{oc}) solarne ćelije	54
3.3.3.3. Zavisnost efikasnosti (η) od fundamentalnih parametara solarnih ćelija	52
3.3.3.4. Zavisnost faktora ispune (ff) od fundamentalnih fizičkih parametara solarne ćelije	53
3.4. Solarne fotonaponske tehnologije	56
3.4.1. Prva generacija solarnih ćelija: solarne ćelije kristalnog silicijuma	59
3.4.2. Druga generacija solarnih ćelija: tankoslojne solarne ćelije	61
3.4.3. Treća generacija solarnih ćelija	62

3.4.3.1. Koncentrisani FN (CPV) sistemi	64
3.4.3.2. Solarne ćelije osetljive na boju	64
3.4.3.3. Organske solarne ćelije	65
3.4.3.4. Razvoj novih solarnih ćelija	66
3.4.4. Poređenje solarnih fotonaponskih ćelija	67

POGLAVLJE 4

MATERIJALIZACIJA NISKO-ENERGETSKIH OBJEKATA FN SOLARNIM PANELIMA	70
4.1. Uvod	70
4.2. Parametri za projektovanje modela izabranih Objekata-prvi, drugi, treći, četvrti objekat	71
4.2.1. Klima Beograda	72
4.2.2. Geoprostorne karakteristike nisko-energetskog Objekta-prvi objekat-Opština Rakovica	72
4.2.3. Geoprostorne karakteristike nisko-energetskih Objekata-drugi i treći objekat-naselje Krnjača, Opština Palilula	73
4.2.4. Geoprostorne karakteristike nisko-energetskog Objekta-četvrti objekat-Opština Obrenovac	75
4.2.5. Analiza geoprostornih karakteristika nisko-energetskih Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat) u odnosu na parametre bioklimatske arhitekture	77
4.2.6. Opis energetske optimizacije nisko-energetskih Objekata-prvi, drugi, treći, četvrti objekat	78
4.3. Određivanje snage FN monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela na fasadama nisko-energetskih Objekata-prvi, drugi, treći, četvrti objekat	80
4.3.1. Snaga FN monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela postavljenih na krovove Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat) za sezonu 2017/18.	88
4.3.2. Snaga FN monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela postavljenih na fasade Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat) za sezonu 2017/18.	91
4.3.3. Snaga FN monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela sa stiroporom postavljenih na krov Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat) za sezonu 2017/18.	93
4.3.4. Snaga FN monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela sa stiroporom postavljenih na fasade Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat) za sezonu 2017/18.	95
4.3.5. Promena snage FN monokristalne silicijumske (sc-Si) solarne ćelije, u okviru FN solarnih panela, pri otvorenim kontaktima temperature za nisko-energetske Objekte (prvi, drugi, treći, četvrti objekat) za	98

sezonu 2017/18.	
4.3.6. Analiza maksimalne snage monokristalne silicijumske (sc-Si) solarne ćelije u materijalizaciji nisko-energetskih Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat) za sezonu 2017/18.	99
4.3.7. Analiza maksimalne snage monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela u materijalizaciji nisko-energetskih Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat) po godišnjim dobima, merenim u toku 2017/18. godine	106
4.4. Primena kadmijum-telurida (CdTe) i bakar indijum diselenida (CIS) u materijalizaciji odabranog modela nisko-energetskog Objekta-prvi objekat, za sezonu 2017/18.	108
4.4.1. Primena solarne ćelije-kadmijum telurid (CdTe) na modelu-prvi Objekat, za sezonu 2017/18.	108
4.4.2. Primena solarne ćelije-bakar indijum diselenid (CIS) na modelu-prvi Objekat, za sezonu 2017/18.	111
4.4.3. Analiza maksimalne snage kadmijum telurida (CdTe) i bakar indijum diselenida (CIS) u materijalizaciji modela nisko-energetskog Objekta-prvi objekat za sezonu 2017/18.	113

POGLAVLJE 5

MATEMATIČKI ALGORITMI KORIŠĆENI ZA OBRADU EKSPERIMENTALNIH REZULTATA UVEĆANJA VEROVATNOĆE I KRIVE VEKA TRAJANJA	115
--	-----

5.1. Uvod	115
5.2. Funkcija raspodele vremena minimalnog napona, funkcija raspodele minimalnog raspona na sistemu fotonaponskih panela	116
5.3. Zakon uvećanja verovatnoće na sistemu fotonaponskih panela	118

POGLAVLJE 6

ZAKLJUČAK	
POGLED U BUDUĆNOST	122
LITERATURA	124

POPIS SLIKA , TABELA, DIJAGRAMA	132
--	-----

PRILOZI

PRILOG 1

EKSPERIMENT	137
1.a. Uvod	137

1.b. Laboratorijsko merenje strujno-naponskih karakteristika	137
1.v. Merenje strujno-naponskih karakteristika u realnim uslovima	140
1.g. Laboratorijsko merenje eksponenta veka trajanja solarnih ćelija	140
1.d. Određivanje krivih veka trajanja i eksperimenata veka trajanja u realnim uslovima	141
1.đ. Provera važenja zakona uvećanja za solarne ćelije u laboratorijskim uslovima	141
1.e. Obrada rezultata merenja	141

PRILOG 2

REZULTATI I DISKUSIJA	143
2.a. Uvod	143
2.b. Strujno-naponske karakteristike solarnih ćelija ispitane pod laboratorijskim uslovima	143
2.b.1. Analiza efekta starenja solarnih ćelija tipa: A, D, E, F, od vremena, opadanjem struje i porastom unutrašnje otpornosti uz parametre: fluks bele svetlosti i monohromatske svetlosti SOX lampe, pod laboratorijskim uslovima	145
2.v. Strujno-naponske karakteristike solarne ćelije pod realnim uslovima..	146
2.g. Određivanje krivih veka trajanja i eksponenta veka trajanja solarnih ćelija u laboratorijskim uslovima	150
2.d. Određivanje krivih veka trajanja i eksponenta veka trajanja solarnih ćelija u realnim uslovima	157
2.đ. Provera zakona uvećanja za solarne ćelije u laboratorijskim uslovima	160
3.a. Potvrda firme „Kuća Mont“ o nisko-energetskim (prvi, drugi, treći, četvrti objekat) Objektima,.....	162
3.b. Karakterizacija nisko-energetskih (prvi, drugi, treći, četvrti objekat) Objekata, korišćeni u istraživačkom delu doktorske teze	163

PRILOG 3

BIOGRAFIJA AUTORA	168
1. Biografija autora	168
2. Potvrda urednika časopisa NT&RP da je naučni rad (SCI lista) prihvaćen i da će biti objavljen	172
IZVEŠTAJ O OCENI DOKTORSKE DISERTACIJE	173

PODACI O AUTORU ODBRANJENE DOKTORSKE DISERTACIJE-	186
Prilog 2	
IZJAVE AUTORA	187
1. Izjava o autorstvu	187
2. Izjava o korišćenju	188
3. Izjava o identičnosti štampane i elektronske verzije doktorske teze ...	189
4. Podaci o autoru odbranjene doktorske disertacije.....	190

POGLAVLJE 1

UVODNA RAZMATRANJA

„Filozof, sa autoritetom državnika, F. Bejkon, tvrdio je: *„U nauci, nema čarobnog šešira; sve što se iz šešira u postupku izvuče, mora prethodno da se u njega stavi, pomoću posmatranja ili eksperimenata, i to ne pukim površnim posmatranjem, niti prostim nabrojanjem podataka, već na osnovu iskustva.*” F. Bejkon, precizira: *„Najpre zapali sveću pomoću hipoteze, a zatim pomoću 21 sveće pokaži put, počinjući kao što se čini sa valjano sistematizovanim iskustvom... i iz njega izvlači aksiome (privremene zaključke), te iz utvrđenih aksioma opet izvodi nove eksperimente... Sam eksperiment će odlučiti.*” [1].

Gore navedni Bejkonov filozovski stav, koji mnogi smatraju odlučujućim za napuštanje sholastike i izbor puta kojim današnji naučno-istraživački rad, pomogli su da se opredelim za logičniji i opravdaniji način, tj. eksperiment zasnovan na afirmisanim teoretskim razmatranjima. Ovakav izbor se činio logičnijim. Alternativa je bila računarsko modelovanje uz uključivanje izuzetno mnogo parametara i posedovanje izuzetno moćnog računarskog sistema. Ako bi se krenulo tim skupljim i neizvesnijim putem, konačni zaključci bi bili prihvatljivi tek nakon eksperimentalne provere. Gore pomenuti filozofski stavovi pomogli su kod prethodnih analiza, informacija o motivu, sadržaju i problemu istraživanja doktorske disertacije.

1.1. Prethodna analiza informacija o motivu, sadržaju i problemu istraživanja

Novo doba zahteva povećane potrebe za energijom. Evidentna je egzistencijalna zavisnost savremenog čoveka od energije. Uočen je problem u stalnom snabdevanju električnom energijom i načinima za kontinuiranu distribuciju. Izazov u ovom radu jeste traganje za rešenjima u proizvodnji električne energije iz obnovljivih izvora i kontinuiranoj distribiciji iste, sa mogućnošću integracije fotonaponskih panela u fasade niskoenergetskih objekata u Srbiji. Jedan od značajnijih problema sa kojima se suočava današnje društvo je briga za zdravlje ljudi i zaštitu životne sredine. Čovekove ishitrene aktivnosti (nedovoljno promišljene) i izostanak briga za posledice ovih postupaka doveli su u pitanje odživost života na zemlji (opstanak planete). Klimatske promene, kao i sve učestalije prirodne katastrofe rezultat su negativnog uticaja čoveka na ekosistem i životnu sredinu [2]. Planeta zemlja se sve više zagreva (efekat staklene bašte) značajno se povećava isparavanje mora i oblačnost. Nabrojane aktivnosti samo su deo pretnji i slabosti koje su presudne za opstanak ljudi. Nažalost, savremeni čovek se seti prirode samo u trenutku kada ima od nje neku direktnu korist ili priliku da je eksploatiše ili koristi bez zadržke konvencionalna prirodna dobra koja nisu nograćena i nisu obnovljiva [2]. Zato se ovo istraživanje bazira na korišćenju obnovljivih izvora energije, u koje spadaju trajni izvori energije, kao što su solarna energija (sunčeva energija), eolska energija (energija vetra), hidroenergija (energija reka), energija

talasa, toplotna energija hidrosfere, energija biosfere (biološka energija), energija biomase, biogasa, odnosno biogoriva [111].

Odlučili smo se za obnovljive izvore energije (OIE) jer zahvaljujući prirodi ovi izvori se mogu delimično pa čak i u potpunosti obnavljati. Svrha njihovog korišćenja je svakako proizvodnja različitih vrsta energija (mehaničke, toplotne, električne) koje su održive, dobro utiču na okruženje i imaju redukovanu emisiju CO₂. Opšte je poznato da postoji više obnovljivih izvora energije kao što su energija vetra, energija sunca, energija biomase, hidro energija. Važno je očuvati razvoj ovakvih energija ukoliko želimo da stvorimo energetske održivost. Time ćemo značajno smanjiti emisiju gasova i stvaranje efekata staklene bašte [3]. Ovakvi koraci ne doprinose samo stvaranju energetske održivosti. Kontinuirana proizvodnja OIE kroz duži vremenski period pruža mogućnost njihove konkurentnosti na tržištu. Ukoliko se ovi izvori koriste duži vremenski period, vrlo je moguće da će oni postati konkurentni na tržištu [3]. Neki od ovih izvora su tokom godina i postali ekonomski konkurentni (solarna energija, energija vetra, energija biomase). I pored toga što su ljudi veoma skeptični kada je u pitanju usvajanje i prihvatanje novih tehnologija, postoji još jedna prepereka, a to je cena. Početna cena za ugradnju novih postrojenja može biti vrlo visoka. Dakle, čitava procedura vezana za instalaciju novih postrojenja kao i visoka početna cena utiče loše na razvoj korišćenja obnovljivih izvora energije u prvih nekoliko godina. Međutim, ako uzmemo u obzir benefit koji dobijamo od dugoročnog korišćenja ovakvih izvora, videćemo da je krajnji rezultat, korist i isplativost, mnogo veći u odnosu na bilo koje konvencionalne konkurente [4].

Ovakva proizvodnja energije je svakako i odlično rešenje za suočavanje sa nadolazećim klimatskim promenama. Kada su u pitanju neobnovljivi izvori energije, njih nije moguće u potpunosti zanemariti. Oni u velikoj meri utiču na sistem međusobne zavisnosti. Uzmimo u obzir da se danas oko 2/3 svetske proizvodnje električne energije koristi samo za grejanje vazduha i vode [5]. Ukoliko se uspešno sprovede koncept energetske efikasnosti i ako se na tome insistira, procenat ukupne energetske potrošnje iz obnovljivih izvora će vremenom postajati sve veći. Po definiciji, energetska efikasnost predstavlja „skup tehnika kojima se opisuje kvalitet korišćenja energije” [5]. Jedna od glavnih karakteristika unapređenja energetske efikasnosti se može primeniti i na proizvodnju i na potrošnju energije. To je svakako smanjivanje gubitka energije bez lošeg uticaja na ekonomsku aktivnost ili remećenja životnih standarda. Mogućnost unapređenja je predmet ispitivanja upotrebe obnovljivih izvora energije, odnosno implementiranjem (integracijom) solarnih panela (paralelni energetski sistem) u fasadne sisteme stambenih niskoenergetskih objekata. Ovakvim direktivama smo dobili definiciju primene različitih tipova energije iz obnovljivih izvora od strane Evropske unije. Konkretno, možemo da izdvojimo direktive 2001/77/EC i 2003/30/EC koje se tiču razvika povećane proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora, kao i podsticanja povećane upotrebe obnovljivih goriva za transport (npr. biogorivo) na međunarodnom energetskom tržištu. U vezi sa primenom ovih direktiva jeste i plan da se do 2020. godine udeo obnovljivih izvora energije popne na 20% ukupne energetske potrošnje. Kada je u pitanju Republika Srbija i njen „Akcioni plan za obnovljive izvore energije“, definisane su akcije vezane za poštovanje obaveza iz „Ugovora o osnivanju energetske zajednice“. Cilj je da se do 2020. godine procenat korišćenja obnovljivih izvora u

bruto nacionalnoj potrošnji Srbije popne na 27%. Ovim aktom su definisane i mere za povećano korišćenje obnovljivih izvora energije [6].

Čovek je morao da pravilno locira mesto boravka prema Suncu kako bi stvorio komfornije uslove za život porodice. Vođeni ovom potrebom, u proteklim decenijama je došlo do razvijanja mnogobrojnih tehnologija kojima se sunčeva energija uspešno transformiše u toplotnu ili električnu energiju. Ta uspešnost je ovim tehnologijama obezbedila i njenu povećanu upotrebu u oblasti ukupne proizvodnje energije. Međutim, još uvek smo na samom početku. Solarna energija proizvodi svega 28,7% električne energije. Ako se vodimo odrednicama „Nacionalnog akcionog plana za obnovljive izvore energije“, ovaj procenat bi trebao biti viši, tačnije do 36,6%. Trebalo bi da razvijemo svest o tome da korišćenjem solarne energije štitimo životnu sredinu. Pored toga što korišćenje solarne energije ima dvojaku svrhu, komercijalnu i humanu, predstavlja i važan deo tehnološkog napredovanja na globalnom nivou. Veliki doprinos su svakako pružile instalirane fotonaponske elektrane – dok je 2.000. godine kapacitet proizvodnje bio manji od 1000 MW, u 2010. godini je iznosio 70.000 MW (podaci su preuzeti iz izveštaja „Evropskog udruženja fotonaponske industrije“) [7].

Ukupna količina energije koju Zemlja prima sa sunčevim zracima iznosi oko 175 milijardi MW i naziva se insolacija. Ova količina je za 100.000 puta veća od snage koju proizvode sve postojeće elektrane na planeti [8]. Primena solarnih sistema u mnogome zavisi od perioda insolacije. Merenje insolacije u Republici Srbiji je poslednji put izvršeno 1987. godine od strane „Saveznog hidrometeorološkog zavoda“. Nakon ovog perioda, u Republici Srbiji nisu vršena nikakva slična merenja.

Sa učešćem od oko 50% ukupne potrošnje energije u svetu, zgrade predstavljaju velike potrošače energije. Samim tim, ako želimo da uspostaviom održivi razvoj, od presudnog je značaja uspostavljanje održivog graditeljstva, uz upotrebu ekoloških materijala i aktivno/pasivno korišćenje solarne energije. Pored efikasnog upravljanja prirodnim resursima, održivo graditeljstvo karakteriše pre svega izgradnja energetske efikasne zgrade koje povoljno utiču na životnu sredinu [8].

Postoji nekoliko presudnih razloga zbog kojih je solarna energija poželjna za korišćenje. Pre svega, solarna energija je prisutna u neograničenim količinama i ne zagađuje životnu sredinu. Dakle, predstavlja čist i pouzdan izvor energije. Usled rasta cene fosilnih goriva (prirodna nalazišta nafte, prirodnog gasa i uglja se intenzivno eksploatišu iako su po prirodi ograničena) upotreba solarne energije predstavlja ekonomski isplativ način da se dođe do toplotne i svetlosne energije. Podsetimo se takođe toga da su primarni pokretači za korišćenje solarnih kolektora vodena energija reka i jezera. Reke i jezera kontinuirano dobijaju vodu iz oblaka i time dobijamo energiju koja se sekundarno koristi za stvaranje neograničene količine elektriciteta i toplote. [9]

Istraživanje mogućnosti ostvarenja ubrzanog starenja, jednoznačno povezanog sa stvarnim starenjem, vršena su opremom i metodologijom koja je razvijena u Institutu za nuklearne nauke „Vinča“ u Beogradu i Elektrotehničkom fakultetu, Univerzitetu u Beogradu, na projektima: Sistemi za navodnjavanje poljoprivrednog zemljišta opštine Bečej; Izrada solarnih repetitora za RTS (Radio Televizija Srbije). Korišćeno iskustvo, deo je tehničkih rešenja iz navedenih projekata („Službeni glasnik RS“, 12/2010), predstavljaju rešavanje pojedinačnih problema. Projekat koji se nametnuo, kao uopšteniji, jer tretira složen sistem i

nudi mogućnost procene efekata starenja solarnih ćelija u laboratorijskim i realnim uslovima [9].

U razvijenim zemljama se u tom pravcu razmatra mogućnost izgradnje pametnih kuća koje su dvosmerno uključene u niskonaponsku mrežu. Ovo se odnosi na arhitekturu visokog nivoa sistema pametnog merenja u širem kontekstu aktivnosti pametnih mreža, kućne automatizacije, itd [10]. Redovna razmena podataka o izmerenoj potrošnji i srodnih informacija dostavljaje se relevantnim trećim licima (npr. snabdevačima, operatoru tržišta, regulatoru tržišta). Infrastruktura pametnog merenja omogućice EPS-u da meri potrošnju:

- 1) trafostanica na srednjem/niskom naponu;
- 2) komercijalnih i industrijskih kupaca na srednjem naponu;
- 3) domaćinstava i komercijalnih i industrijskih kupaca na niskom naponu.

Kontekst pametnog merenja, Pametno merenje, obezbeđuje dvosmerni protok informacija između pametnih brojlara i definisanih učesnika na tržištu. Pametni sistemi merenja mogu postojati u kontekstu većih infrastruktura pametnih mreža, a takođe mogu i da koegzistiraju sa sistemima kućne automatizacije. Funkcionalni obim pametnog merenja može varirati od automatizacije procesa prikupljanja mernih vrednosti, do pune automatizacije i nadzora niskonaponske mreže. Kada je u pitanju merenje električne energije, od posebnog je značaja i omogućavanje Smart Grid aplikacija, posebno sa uključivanjem distribuirane proizvodnje. Na ovaj način se omogućava razmena mernih podataka i drugih informacija između distributivnih preduzeća i njihovih kupaca [10].

U oblastima sa manje stanovništva, na primer u Africi, pribegava se korišćenju solarnih elektrana u vidu tzv. ostrvskog snabdevanja električnom energijom. Naime velika neiskorišćena prostranstva, siromaštvo i mali broj ljudi uslovi su da se pomoću solarnih elektrana snabdeva samo veće naseljeno mesto. To su sistemi koji pronalaze primenu u objektima koji su udaljeni od elektrodistributivne mreže, kao što su vikendice, salaši, čamci, kao i telekomunikacioni objekti i objekti za distribuciju nafte i gasa. Ovi sistemi se koriste za sopstveno napajanje potrošača električnom energijom. Ovim sistemom, nesmetano, mogu da reše napajanje potrošača kao što su rasveta, TV, frižider, pumpa za vodu, a, po potrebi, mogu da reše napajanje većih potrošača. Za malo udaljenije potrošače, to već nije moguće [11].

Postoji mogućnost primene fotonaponske konverzije energije na nisko-energetskim objektima. Za sada je moguće razmatrati korišćenje fotonaponske konverzije (solarnih ćelija) kao paralelnog sistema za napajanje nisko-energetskih objekata. Godine 2012, u Republici Srbiji je donesen „Nacrt strategije za razvoj energetike“. Nacrt obuhvata period do 2025. godine sa projekcijom do 2030. godine. Strateški razvoj energetike zasnovan je na uspostavljanju balansa između proizvodnje energije iz dostupnih izvora, potrošnje energije sa tržišnim i socijalno održivim karakterom, i efikasnije proizvodnje i korišćenja što „čistije“ energije iz obnovljivih izvora (OIE). Drugim rečima, efikasnijom proizvodnjom energije iz dostupnih i obnovljivih izvora, sa planiranim i isplativim plasmanom, moguće je uspostaviti održivi energetski sistem. S druge strane, strateški pristup energetici je put smanjenja ekoloških pretnji i ekonomskih troškova u cilju razvoja energetskog sistema [12].

S obzirom na to da je električna energija u Srbiji još uvek jeftina, oblast investiranja u obnovljive izvore energije još uvek nije dobila zasluženi značaj u oblasti energetskog i

privrednog razvoja Republike Srbije. Tome se mora dodati i nedovoljno poznavanje faktora koji bi uticali na popularizaciju korišćenja ovakvih izvora. Tu se konkretno radi o ekološkim i ekonomskim pokazateljima, detaljnijem izučavanju tehnologija, kao i o komparativnim analizama. Komparativna analiza, urađena stručno i precizno, bi mogla da nam pruži informacije o ekološkim efektima i o periodu isplativosti nakon uvođenja novih tehnologija. Jedna od najvećih prepreka vezana za korišćenje obnovljivih izvora energije je svakako i visoka cena i velika početna ulaganja za instalacije, uređaje i izgradnju kuća koje se snabdevaju obnovljivim izvorima energije. Kako be se stvorili preduslovi za korišćenje i ulaganje u zelenu energiju, moramo prvo oformiti stratešku i političko legislativnu atmosferu koja će podržati korišćenje obnovljivih izvora energije. Gore pomenuta „Strategija razvoja energetike Republike Srbije“ pruža nam određena predviđanja u kojima se kaže da će se u narednoj deceniji uspostaviti inovativni kvalitet novog stanja za vršenje energetske delatnosti. Ovakvom politikom Republike Srbije, zaključeni su i definisani okviri na polju institucionalnih, zakonodavnih, ekonomsko poslovnih i strukturno organizacionih delovanja. Ovakvim koracima predviđeno je i to da će se energetika Republike Srbije uspešno priključiti tokovima regionalnih i panevropskih integracija [12].

Nakon svih, gore, iznesenih činjenica, možemo zaključiti da se značajnim povećanjem primene solarne energije zapravo približavamo standardima Evropske unije o korišćenju obnovljivih izvora energije. U korist očuvanja životne sredine, tendencija globalne energetike je da se sve više oslanja na obnovljive izvore, a sve manje na iscrpive resurse. Uvođenjem principa „čistije“ i štedljivije proizvodnje energenata, razvija se i koristi sve efikasnija oprema i tehnologija, podstiču se projekti širokog spektra primene, od malih domaćinstava koja se priključuju na distributivnu mrežu do kapaciteta industrijskih razmera. Strateški nacionalni ciljevi su da se raspoloživi obnovljivi resursi koriste u proizvodnji električne energije, u toplanama i finalnoj potrošnji, kao i u saobraćaju. Stvaranjem boljih uslova u oblasti finansija, privrede i ekonomije, a za korišćenje obnovljivih izvora energije, postizemo i očuvanje održivosti energetike uopšte [13].

Na osnovu analize dosadašnjih istraživanja možemo zaključiti da termičko dejstvo sunčevog zračenja treba da se iskoristi efikasnije sada kada je stanovništvo za to motivisano. Ovakav vid korišćenja energije, koji je povoljan sa ekonomskog i ekološkog aspekta, može da se iskoristi sada, u trenucima kad se nedostatak energije u svetu drastično povećava i oseća. Takođe se morati uzeti u obzir i činjenica da cena struje u Republici Srbiji raste kako bi se približila ceni struje u Evropskoj uniji. Sve ovo će dodatno stimulisati stanovništvo da racionalnije koristi izvore energije. Naravno, država treba da ponudi i dodatne poreske olakšice vezane za instaliranje opreme za prikupljanje energije što bi se višestruko isplatilo na dugoročnom planu. Na kraju bi sve to rezultiralo i dovelo do toga da država više ulaže u razvojne i istraživačke projekte. Analiza dosadašnjih istraživanja omogućila mi je da uočim koji su pravci, predmet i obuhvat provedenog istraživanja, koje je tema narednog poglavlja.

1.2. Predmet i obuhvat istraživanja

Ovaj rad se bavi ispitivanjem mogućnosti unapređenja energetske karakteristika postojećih stambenih nisko-energetskih objekata u Beogradu. Dobijeni rezultati važe i za

druge urbane sredine, uz određena ograničenja koja se odnose na modul naseljenosti čovekove sredine. Mogućnost unapređenja biće predmet ispitivanja upotrebe obnovljivih izvora energije, odnosno implementiranjem (integracijom) solarnih panela (paralelni energetska sistem) u fasadne sisteme stambenih niskoenergetskih objekata. Prvo se vrši odabir solarnih ćelija za eksperiment, na osnovu provedenih analiza karakteristika sve tri generacije savremenih fotonaponskih (FN) tehnologija (tj. solarnih ćelija). Zatim se vrednuju idealne karakteristike bioklimatskih parametara i klimatske uslove lokaliteta stambenih niskoenergetskih objekata. U procesu varijacije pozicije solarnih panela, termičke izolacije između panela i fasade, te ispitivanje različitih materijala izrađene solarne ćelije, imaju značajan uticaj. Na osnovu dobijene maksimalne snage solarnih panela uvideće se mogućnost ušteda potrošnje konvencionalnih vidova energije. Namera je povećati komfor boravka u unutrašnjem prostoru, te integracijom solarnih panela u fasadni sistem omogućiti dodatnu električnu snagu koja može da utiče na ekonomsko-energetski bilans objekata. U cilju provere ekonomičnosti ponuđenog sistema primeniće se sofisticirane nuklearne metode ubrzanog starenja solarnih panela, što će omogućiti procenu odnosa uložених sredstava za izbor sistema solarnih panela. Na osnovu predmeta rada i istraživačkog obuhvata mogu se odreditи ciljevi i zadaci istraživanja.

1.3. Ciljevi i zadaci istraživanja

Glavni cilj provedenih istraživanja je preispitati mogućnost i ekonomsku opravdanost, napajanja nisko-energetskih objekata solarnim panelima, integracijom u fasadne sisteme objekata u Srbiji. Iskustveno su sagledane varijacije bioklimatskih parametara (položaj niskoenergetskih objekata u odnosu na pravac istok-zapad, konfiguracija terena, orijentacija, izloženost vetru, vegetacija), vrednujući klimatske uslove lokaliteta niskoenergetskih objekata i varijaciju pozicije solarnih panela, termičke izolacije između panela i fasade, te ispitivanje različitih materijala izrađene solarne ćelije.

Kao podcilj ovoga rada, postavljeno je formiranje eksperimentalno-numeričkog algoritma. Eksperimentalno-numerički algoritam je zasnovan na statističkim metodama za određivanje relevantnih parametara sistema za fotonaponsku konverziju energije, ugrađenih na stambenim objektima sa malom kombinovanom mernom nesigurnosti.

Da bi se ovaj cilj ostvario, bilo je nužno razviti odgovarajući eksperiment i definisati eksperimentalni postupak u skladu sa propisima. U tom smislu, formirane su radne hipoteze koje treba dokazati.

1.4. Polazne hipoteze u istraživanju

Prva hipoteza: *Korišćenjem solarne energije u nisko-energetskim objektima u Srbiji mogu se dobiti brojne pogodnosti koje se u najkraćem mogu identifikovati kao smanjenje i ušteda potrošnje konvencionalnih vidova energije i povećanje komfora boravka u unutrašnjem prostoru.*

U skladu sa tim, ovom hipotezom se pošlo od osnovnih pretpostavki:

- obezbediti paralelni energetska sistem koji je nezavisan od distributivne mreže i koji se sastoji od solarnih panela, zaštitnih električnih kola, akumulatorskih baterija, provodnika i dc/ac konvertora gde je to nužno;
- ovakav paralelni energetska sistem, treba da obezbedi funkcionisanje objekata u uslovima ispada iz distributivnog sistema, a da se njime vrši dopunsko snabdevanje u normalnim uslovima;
- da je paralelni energetska sistem pogodan u urbanim sredinama pošto su neškodljivi po životnu sredinu, glavni su saveznici ljudi u borbi protiv klimatskih promena, a njihovu posebno bitnu održivu odliku predstavlja smanjena emisija ugljen-dioksida u procesu proizvodnje energije, bilo električne, toplotne ili mehaničke; i dok su zalihe fosilnih goriva, kao njihovih „prljavih“ konkurenata u oblasti energetskog snabdevanja, ograničene, OIE su, zbog svoje prirode, neiscrpni.

Provedene kompleksne analize lokacije i detaljno razmatranje karakteristika i parametara sunčevog zračenja na konkretnoj lokaciji, bili su bitan uslov kako bi se postigla začajnja efikasnost fotonaponskih panela. Solarni paneli prema svojoj standardnoj konstrukciji predstavljaju dodatnu termičku izolaciju nisko-energetskih objekata pošto su koncipirani tako da se ne zagrevaju, ne propuštaju toplotu ni u jednom pravcu, te su pogodni za integraciju u fasadni sistem. Integracijom solarnih panela se dobija dodatna električna snaga koja može da utiče na ekonomsko-energetski bilans objekata, koji se kreće od pretpostavki:

- pošto postoje dva paralelna, međusobno nezavisna sistema, napajanje objekata električnom energijom se može balansiranjem potrošnje (s obzirom na tarifni sistem koji važi u Republici Srbiji) ostvariti ušteda;
- svrsishodnost ove hipoteze se treba detaljno razmotriti sa ekološko-ekonomskog aspekta uzimanjem u obzir ove investicije u izradi fotonaponskih paralelnih sistema, kao i održavanje i odlaganje;
- to omogućava procenu odnosa uložene energije u izradi fotonaponskog sistema na nisko-energetske objekte i dobijene energije (naravno, ovde se umesto energije može koristiti i izraz finansijska sredstva, pošto su to, usled svoje apsolutne konvertibilnosti u današnje vreme indentične veličine, tj. pojmovi).

Za aplikaciju fotonaponskih sistema moguća su različita tehnička rešenja u vidu raznovrsnih, inovativnih i održivih materijalizacija fasada nisko-energetskih objekata u Srbiji

Druga hipoteza: *Korišćenjem računarskih simulacija u procesu projektovanja i dimenzionisanja fotonaponskih panela, primenjenih u materijalizaciji fasada nisko-energetskih objekata u Republici Srbiji, moguće je postići optimalno iskorišćenje sunčeve energije i ostvariti uštede potrošnje konvencionalnih izvora energije, što daje ekonomsku isplativost primene ovih sistema.*

U skladu sa drugom hipotezom, polazi se od nekoliko pretpostavki:

- metode matematičke statistike (zakon porasta verovatnoće) uz odgovarajuću softversku podršku omogućavaju uopštavanje eksperimentalno dobijenih rezultata na pojedinim delovima fasade na kompletan objekat i time

optimiziraju dimenzionisanje konačne materijalizacije fasade nisko-energetskih objekata fotonaponskim panelima.

1.5. Naučne metode istraživanja

U ovom radu su korišćene sve uobičajene metode savremenog istraživanja: izbor istraživanja, prikupljanje podataka, teoretska razmatranja, pregled dosadašnjih istraživanja, metode analize, numeričke metode, eksperimentalne metode. Eksperimentalna metoda dugotrajne karakterizacije relevantnih parametara fotonaponskih izvora energije integrisane u nisko-energetske objekte u Republici Srbiji je jedna od osnovnih, koja je pomogla da se dođe do eksperimenta, koji se vrši u realnim uslovima na prethodno izabranim objektima različitih bioklimatskih parametara. Ispitivanja će se vršiti pomoću modela solarnog sistema, u koji će biti uključene sve karakteristike posmatranih objekata matematičko-numeričkim prihvatljivim oblikom. Dobijeni rezultati biće uopšteni, kako bi se dimenzionisao ceo objekat, te primenom Zakona o porastu verovatnoće ugrađenom u odgovarajući softverski paket vrednovao dobijeni rezultat. Ispitivanja su vršena neprekidno - godinu dana pri čemu su razmatrane i klimatske karakteristike, kao i godine od tipičnih (maksimalne dnevne temperature; broj sunčanih, poluoblačnih i oblačnih i kišnih dana, brzina vetra, ruža vetrova). U cilju provere ekonomičnosti sistema, koja najviše zavisi od veka trajanja ugrađenih panela, primeniće se sofisticirane nuklearne metode ubrzanog starenja solarnih panela (pošto bi ispitivanje i procena veka trajanja solarnih panela bila vremenski krajnje neekonomična), što će omogućiti procenu odnosa uložених sredstava za izbor sistema solarnih panela što treba da bude ako ne presudan faktor u odlučivanju.

Komponente za fotonaponsku konverziju energije primenjivane u okviru eksperimentalnog dela bila su od monokristalnog silicijuma. Vršeni su određeni eksperimenti polikristalnim silicijumom kao i drugim poluprovodničkim legurama i jedinjenjima energetskog procepa oko 1eV. Međutim, pošto je jedan od osnovnih ciljeva bilo ispitivanje ekonomske isplativosti na nisko-energetskim objektima (prvi, drugi, treći, četvrti Objekat), polikristalne fotonaponske ćelije su odbačene zbog male efikasnosti, a poluprovodnička jedinjenja i legure dobijena inženjeringom energetskog procepa su odbačena zbog neekonomičnosti – visoke cene njihove proizvodnje, odnosno velikog utroška energije Čohaljskog, koja nikako ne bi mogla da se vrati u komercijalnim uslovima za nisko-energetske objekte (prvi, drugi, treći, četvrti Objekat).

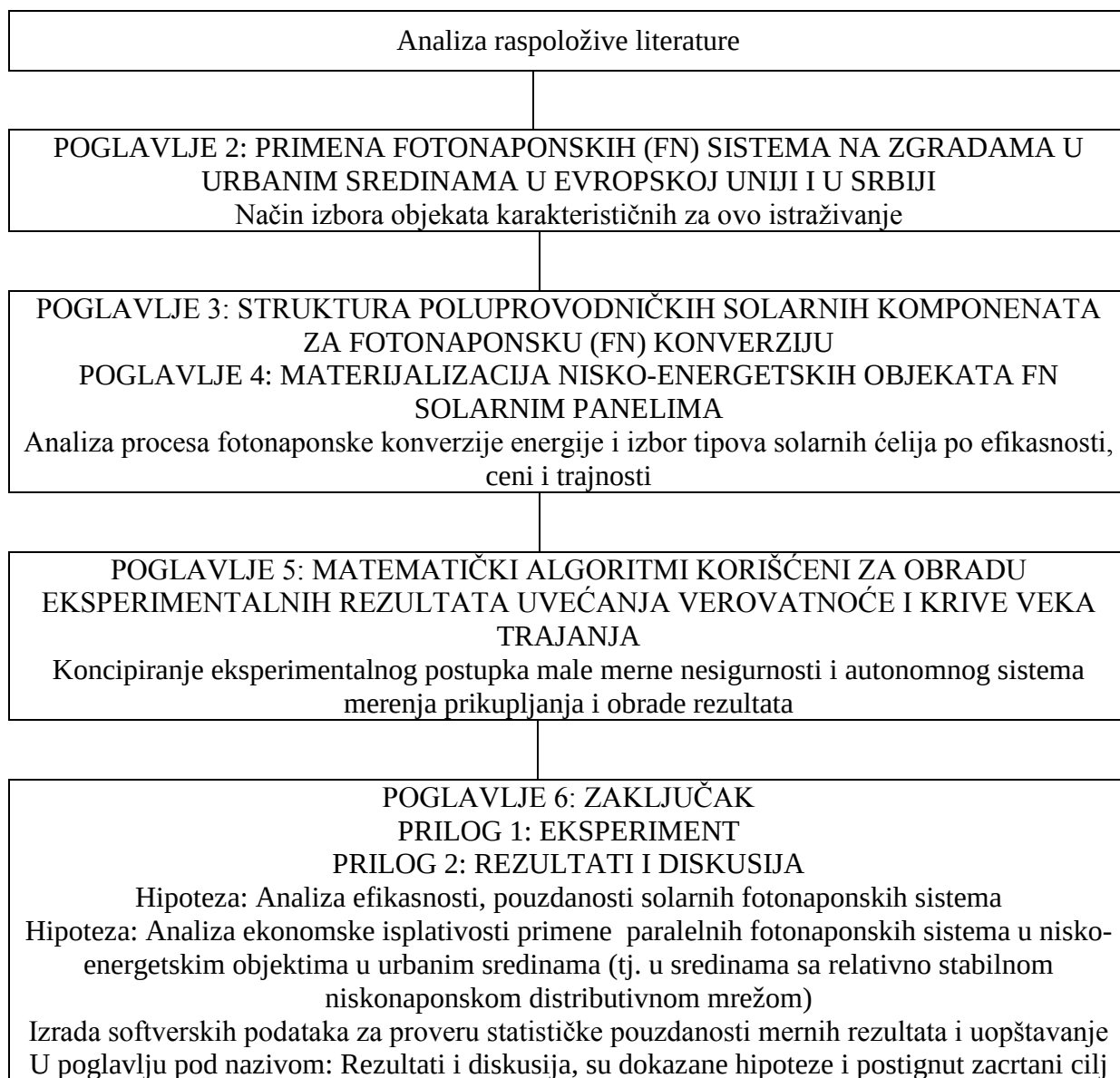
Primenjene metode su pažljivo izabrane u skladu sa najvišim standardnim karakterističnim poluprovodničkim materijalima što je bilo moguće uraditi zahvaljujući dobroj opremljenosti laboratorija (opremom visoke klase tačnosti i male kombinovane matematičke nesigurnosti) Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, Zavoda za fiziku tehničkih fakulteta u Beogradu i Instituta za nuklearnu fiziku „Vinča“ u Beogradu. Osnovna struktura plana iznesenog u prijavi teze je zadržana, ali su izvršena i dodatna istraživanja koja su se pokazala mogućim i interesantim tokom proteklog vremena od trenutka prijave do završetka. Ove dopune plana rada značajno su osavremenile i unapredile istraživanja u disertaciji. Izvršena ispitivanja i metode obrade dobijenih rezultata su adekvatno postavljene i skladu sa dokazima hipotezama iz prijave disertacije. Ni jedno dodatno ispitivanje ne bi moglo značajnije da utiče na definisani i očekivani rezultat. Naravno, to nipošto ne znači da se

istraživanja u ovoj oblasti ne mogu nastaviti i da ne mogu doneti nove sofisticiranije naučne rezultate kojima će rezultati iz disertacije biti dobra smjernica za dalji rad.

Primenjene statističke metode koje pored standardnih statističkih postupaka koriste zakon porasta verovatnoće, procenu krivih veka trajanja uz primenu statističkih raspodela ekstremnih vrednosti predstavljaju pouzdane metode koje su verifikovane u poslednjih par godina u naučnim radovima objavljenim u vrhunskim časopisima sa SCI liste, a za oblast procene veka trajanja elektro-energetskog postrojenja. Te metode preuzete i primenjene u ovom radu su veoma pouzdane i modeli razvijeni na bazi njih se mogu smatrati jednim značajnim doprinosom primene statističke matematike u efikasnosti nisko-energetskih objekata (prvi, drugi, treći, četvrti Objekat).

Predlog plana istraživanja je prikazan na dijagramu 1.1.

Dijagram 1.1. Strukturni dijagram procesa istraživanja



Za eksperiment je bitna reproduktivnost rezultata i mala kombinovana merna nesigurnost
Pri tome se posebno obraća pažnja na izostanak većih oscilacija u prosečnoj vrednosti merne
nesigurnosti tip A

1.6. Generalna struktura doktorske disertacije

Doktorska disertacija razrađena je u skladu sa zahtevanom metodologijom-Odlukom Univerziteta u Banjoj Luci,¹ započinje sa sažetkom, prati je spisak skraćenica i šest poglavlja istraživanja, tri priloga, spisak literature, biografija autora i izjave.

Prvo poglavlje, nosi naziv: Uvodna razmatranja i obuhvata prethodne analize informacija o motivu, sadržaju i uočenim problemima, koje je autor tretirao kao izazove. Sledi predmet i obuhvat istraživanja. Glavni cilj sa podciljevima i zadaci istraživanja, su logičan sled aktivnosti. Zatim su definisane polazne hipoteze i naučne metode u istraživačkom procesu. Detaljno je obrazložena generalna struktura provedenih istraživanja u ovom radu. Posebno je istaknuta naučna opravdanost doktorske disertacije i očekivani rezultati provedenih istraživanja, uz najavu drugog poglavlja.

Drugo poglavlje nosi naslov Primena fotonaponskih (FN) sistema na zgradama u urbanim sredinama u EU i Srbiji. Zapčinje sa uvodnim delom u kome se razmatra implementacija FN sistema u gradovima i urbanim sredinama. Dat je detaljan pregled primene fotonaponskih (FN) sistema na objektima u urbanim sredinama u EU. Predstavljene su studije slučaja u gradovima EU: Projekat- Stambeni objekti za solarnu energiju Köln-Bocklemünd u Severnoj Rajni-Vestfaliji (NRW); Projekat stambenog kompleksa „Pal Town Josai-no-Mori”, u Ota City, Gunma Prefektura u Japanu; Projekat La Darnaise, Grand-Lyon konurbacije u Francuskoj. Sledi objašnjenje stanja i primene fotonaponskih sistema u Srbiji. Navedeni su i detaljno objašnjeni parametri značajni za projektovanje nisko-energetskih stambenih objekata uz uvažavanje principa bioklimatske arhitekture. U ovom poglavlju prikupljena su iskustva o integraciji solarnih panela u fasadne sisteme i date smernice, zaključna razmatranja, kao polazna osnova za treće poglavlje.

Poglavlje tri: Struktura poluprovodničkih solarnih komponenata za fotonaponsku (FN) konverziju, ima za cilj da uvede i detaljno opiše osnove mikroskopskih i makroskopskih procesa u poluprovodničkim komponentama za fotonaponsku konverziju energije. Ono ima za cilj da pomogne u boljem razumevanju koncepcije eksperimentalnih postupaka i izvora odgovarajuće kombinovane merne nesigurnosti. Podeljeno je na četiri podpoglavlja. Prva dva podpoglavlja su uvod i karakteristike poluprovodničkih materijala u kojima se razmatraju energetske strukture poluprovodničkih materijala uz navođenje i pojašnjavanje pojmova valentne, zabranjene i provodne zone. Treće podpoglavlje: Principe rada i osnovne izlazne karakteristike fotonaponske solarne ćelije pojašnjava Zavisnost struje kratkog spoja i napona otvorenog kola solarne ćelije od osnovnih fizičkih parametara, analizira Gustinu

¹ Senat Univerziteta je na 2. sjednici održanoj 18.07.2016. godine, deneo O D L U K U o formi i sadržini Prijave teme za izradu doktorske disertacije Izvještaja o ocjeni podobnosti kandidata, teme i mentora za izradu doktorske disertacije i Izvještaja o ocjeni urađene doktorske disertacije

struje kratkog spoja, prati Napon otvorenog kola, Zavisnost efikasnosti od fundamentalnih parametara solarnih ćelija, kao i Zavisnost faktora ispunje od fundamentalnih fizičkih parametara. Na bazi gore izloženog razjašnjeno je poznavanja spektra bele (sunčeve) svetlosti, objašnjen izbor materijala za izradu solarnih ćelija (Solarne fotonaponske tehnologije (FN)) koje rade na principu p-n spoja. U četvrtom podpoglavlju je objašnjeno funkcionisanje i primena solarnih fotonaponskih tehnologija (FN) (uz analizu tri generacije solarnih ćelija), koncentrisanih FN tehnologija, organskih ćelija i solarnih ćelija osetljivih na boju. Takođe je dat i prikaz novih i nastajućih koncepata solarnih ćelija, kao i prikaz poređenja solarnih fotonaponskih tehnologija. Utvrđene su smjernice i zaključna razmatranja za treće poglavlje, kao polazna osnova za najavu četvrtog poglavlja.

Poglavlje četiri: Materijalizacija nisko-energetskih objekata FN solarnim panelima počinje uvodom u kojem se govori o razlozima primene FN solarnih panela na stambeno-poslovne objekte u cilju postizanja veće uštede energije i komfora stanovanja, uz proveru ispativosti njihove primene. Izvršena je analiza geoprostornih karakteristika četiri karakteristična nisko-energetska objekta, prema principima bioklimatske arhitekture, uz energetsku optimizaciju istih. Na osnovu njihovih lokaliteta, određeni su klimatski uslovi potrebni za projektovanje solarnih panela na fasadama navedenih objekata. Odgovarajućim softverskim paketom izvršeno je postavljanje solarnih panela na sva četiri nisko-energetska objekta na sledeće načine: solarni paneli postavljeni na krovove objekata; solarni paneli postavljeni na fasade objekata; na krovove objekata uz postavljeni termički materijal, stiropor, između solarnih panela i krova; solarni paneli postavljeni na fasade objekata uz stiropor, postavljen između solarnih panela i fasade objekata. U podpoglavlju tri softverskim paketom sračunate (dobijene) vrednosti snage solarnih panela (FN monokristalna silicijumska ćelija—odabrani materijal za solarnu komponentu iz prve generacije tehnologija) i određen dijagram promene snage solarne ćelije pri otvorenim kontaktima temperature za nisko-energetske (prvi, drugi, treći, četvrti) objekte. Izvršena je tabelarna analiza promene snage solarnih panela za sva četiri objekta. U četvrtom podpoglavlju proverena je mogućnost veće efikasnosti nisko-energetskih objekata primenjeni su materijali iz druge generacije solarnih panela (Primena kadmijum-telurida (CdTe) i bakar indijum diselenida (CIS) u materijalizaciji odabranog modela nisko-energetskog objekta) za dobijanje snage na jednom, karakterističnom objektu (Prvi Objekat), čije su vrednosti analizirane i upoređivane sa rezultatima monokristalnih silicijumskih solarnih panela. Utvrđene su smernice i zaključna razmatranja za četvrto poglavlje, kao polazna osnova za najavu petog poglavlja.

Poglavlje pet: Matematički algoritmi korišćeni za obradu eksperimentalnih rezultata uvećanja verovatnoće i krive veka trajanja, obrađeni su u tri podpoglavlja. Prvo je uvodni deo u kome je dat pregled matematičkih algoritama primenjenih na na eksperimentalne rezultate njihovog uopštovanja i donošenja zaključaka za realno dimenzionisanu materijalizaciju fasade nisko-energetskih objekata na osnovu merenja pomoću dobro koncipiranih i kontrolisanih modela. Slede još dva podpoglavlja: Zona uvećanja i kriva veka trajanja solarnih ćelija. Zona uvećanja se primenjuje da bi se izbegla trivijalnost (tačnije netačnost) pretpostavke da se rezultati dobijeni na modelu mogu uopštiti dimenziono. Prosti matematički algebarski postupak množenja, odnosno zakon o množenju nezavisnih verovatnoća uz primenu asimetričnih raspodela to strogo zabranjuje. Algoritam određivanja krivih veka trajanja, odnosno eksponenta veka trajanja, je korišćen pošto omogućava procenu

vremena efikasne primene paralelnog fotonaponskog sistema u uslovima realnih eksperimenata. Navedeni podaci su značajni za procenu ekonomičnosti primene solarnih ćelija, odnosno solarnih panela u materijalizaciji nisko-energetskih objekata, što je osnovni parametar za odlučivanje da li je realno primeniti ovaj fotonaponski sistem. Utvrđene su smernice i zaključna razmatranja za peto poglavlje, kao polazna osnova za šesto poglavlje.

Poglavlje šest, tj. Zaključak, sadrži zaključna razmatranja o postignutim rezultatima sa naglaskom na ispunjenje postavljenih ciljeva, dokazanih hipoteza, uz isticanje naučnog doprinosa disertacije, kao preporuke i smernice za buduća istraživanja u ovoj oblasti.

U Prilozima jedan i dva, su dati rezultati eksperimentalnog postupka, obrada eksperimentalnih rezultata i diskusija o rezultatima dobijenim usled: određivanja strujno-naponske karakteristike solarne ćelije u laboratorijskim i u realnim uslovima; krivih veka trajanja i eksponenta veka trajanja u laboratorijskim i realnim uslovima; provere zakona uvećanja za solarne ćelije u laboratorijskim uslovima.

U prilogu tri, dati su biografski podaci mogućeg doktoranta i izjave o autorstvu, o korišćenju i izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorske teze.

Da bi se cilj istraživanja mogao ostvariti potrebno je na osnovu sistematizovane literature vrednovati do sada provedena istraživanja i napraviti kritički osvrt kao polaznu osnovu za istraživanja u ovoj disertaciji.

1.7. Naučna opravdanost i očekivani rezultati provedenih istraživanja

Značajan problem u eksploataciji obnovljivih izvora u bliskoj prošlosti bio je izostanak adekvatnog pravnog okvira. Ako bi se inteziviralo investiranje međunarodnih i investitora iz Srbije, znatno bi se smanjila tražnja za energijom na tržištu. Besplatna energija koja se dobija iz obnovljivih izvora značajno bi uticala na smanjenje cene električne energije [14]. To bi uzrokovalo povećanje broja radnih mesta i donekle ekonomskoj stabilnosti, a kao jedan od najznačajnijih rezultata bio bi smanjenje zagađenosti i očuvanje životne sredine [14].

Jedini način da se postignu ovakvi ciljevi i realizuju obaveze Republike Srbije prema EU i Energetskoj zajednici jeste da se upotreba OIE potkrepi svim neophodnim pravnim procesima i ubrzaju procedure prikupljanja potrebnih dokumentacija [13,14]. Na taj način bi se investitori podstakli na nova ulaganja i na taj način motivisali druge na stvaranje novih projekata za obnovljive izvore energije u Republici Srbiji [13,14]. Od posebnog je značaja širenje svesti o prednostima i koristima povećanja upotrebe obnovljivih izvora energije, zatim uključivanje javnosti u vidu informisanja o procesima realizacije projekata vezanih za ove izvore energije, kao i pružanje podrške Ministarstvu rudarstva i energetike od strane drugih ministarstava, vladinih i nevladinih organizacija i svih drugih zainteresovanih strana. Neophodno je dati šanse i mogućnost nezavisnim akterima da se priključe za početak ili sami pokrenu nove projekte u ovoj oblasti.

Iz svega navedenog može se zaključiti da mesta za napredovanje i investiranje u obnovljive izvore energije u Republici Srbiji svakako ima potencijala i predstavlja značajan vid energetske sigurnosti ne samo za sadašnje već i za buduće generacije [13,14]. Naučni doprinos očekivanih rezultata saglediv je u mogućnosti kvalitativnog i kvantitativnog

predviđanja veka trajanja solarnih ćelija, uz primenu eksponenta veka trajanja (a može se primeniti i na druge poluprovodničke komponente).

Osnovni doprinos teze se sastoji u rešavanju problema pouzdanog starenja i mogućnosti procene radnog veka komponenti za fotonaponsku konverziju energije. Ovaj doprinos je postignut zahvaljujući adekvatnoj primeni statističke metode određivanja veka trajanja proizvoljnog sistema na osnovu praćenja karakteristika kvantila relevantnih slučajnih promenljivih reprezentativnog uzorka. Pored toga, u radu su data i naučno zasnovana tumačenja procesa starenja na bazi fotonsko-fononskih interakcija. U radu je takođe izvršena detaljna analiza budžeta merne nesigurnosti i izvršena je realna procena kombinovane merne nesigurnosti eksperimenta čime je demonstrirano poznavanje ove nove oblasti u teoriji metrologije, a samim tim i dat stručni doprinos.

Na osnovu prethodno rečenog, jasno se može zaključiti da se osnovni dobijeni naučni doprinos sastoji od razvoja metode efektivnog radnog veka solarne ćelije, na osnovu originalno razvijenog statističkog matematičkog algoritma, koji je u radu primijenjen na lokalitetu grada Beograda, i pri tom ima univerzalni karakter. U ovaj model su uključeni najbitniji ambijentalni uslovi sa makroskopskog nivoa i data tumačenja njihovih mikroskopskih efekata. U tom smislu je predloženi postupak karakterističan za lokalitet grada Beograda, a strogo se vodilo računa da algoritam ne bude zatvoren, već da se u njega mogu uneti i drugi ambijentalni efekti karakteristični za neke druge lokalitete, tj. predloženi algoritam je otvoren za nadogradnju po svim elementima.

Utvrđene su smernice i zaključna razmatranja za prvo poglavlje i to su: besplatna energija dobijena iz obnovljivih izvora značajno bi uticala na smanjenje cene električne energije; povećanje broja radnih mesta i donekle ekonomske stabilnosti; smanjenje zagađenosti i očuvanje životne sredine. Ona predstavljaju uvodna razmatranja što jeste polazna osnova za drugo poglavlje.

POGLAVLJE 2

PRIMENA FOTONAPONSKIH (FN) SISTEMA NA ZGRADAMA U URBANIM SREDINAMA U EVROPSKOJ UNIJI I U SRBIJI

2.1. Uvod

„EU pokazuje političku volju da postigne značajni napredak u daljem iskorišćavanju obnovljivih izvora energije, smanjenju emisije gasova sa efektom staklene bašte i unapređenju energetske efikasnosti, u cilju stvaranja ekonomije sa niskim nivoom ugljenika. Klimatska i energetska politika EU do 2030. godine trebalo bi da razvije „konkurentan i siguran energetski sistem koji obezbeđuje pristupačnu energiju svim potrošačima, povećava sigurnost snabdevanja energijom u EU, smanjuje zavisnost od uvoza energije i stvara nove prilike za rast i poslove.“ [15].

Na osnovu navedenog se može zaključiti da je EU postavila nove ciljeve vezane za korišćenje obnovljivih izvora energije. Naime, plan je da od ukupne potrošnje energije najmanje 27% bude iz obnovljivih izvora i da ovo bude ostvareno do 2030. godine. Pored toga što će ovakva strategija poboljšati energetska bezbednost, takođe će se uspostaviti stabilnija zelena ekonomija, tehnološki napredak će postati inovativniji, smanjiće se zavisnost od uvoza energije kao i cena dekarbonizacije. Ovim se definišu novi prioriteti i šalje se jasna poruka investitorima da treba više da ulažu u obnovljive izvore energije jer su smanjeni troškovi i rizici ulaganja. Smanjenje troškova ulaganja dovešće do toga da cena električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora energije postane jednaka ili manja od cene električne energije na mreži. Ovakva situacija nas dalje dovodi do toga da će se smanjiti potreba za raznim mehanizmima podrške iliti subvencijama na dugoročnom planu [15].

Oko 70% električne energije se danas proizvodi iz fosilnih goriva i samo 20% iz obnovljivih izvora energije. U budućnosti će verovatno doći do potpunog obrta. Tačnije, predviđa se da će se 65% električne energije proizvoditi iz obnovljivih izvora energije, dok će se 20% proizvoditi iz fosilnih goriva u periodu do 2050. godine [17]. Dodatne informacije kada je reč o godini 2050. dobijamo od kompanije „Šel“. Naime, prema njihovom scenariju 50% proizvodnje svetske energije će biti snabdeveno obnovljivim izvorima energije [18]. U institute “Grinpis” se tvrdi da će se čitav energetski sistem u potpunosti zasnivati na obnovljivim izvorima energije u periodu do 2100. godine. Uz to se pretpostavlja da će se u naznačenom periodu uspostaviti i kontinuirani godišnji rast od 2% u korišćenju energije [19].

Na osnovu svega prethodnog, možemo sa sigurnošću da predvidimo da će solarna energija postati dominantni izvor energije u periodu do 2050. godine. Pored toga što se već u dva scenarija “Međunarodne agencije za energetiku” solarna energija približava zastupljenosti ostalih energija (npr. hidroenergiji, nuklearnoj energiji i energiji vetra), predviđa se i da će solarna energija proizvoditi više od četvrtine svetske električne energije u periodu do 2050. godine. Uzmimo u obzir i scenarija kreirana od strane IEA i hi-RENa. Njihove tehnološke smernice upućuju na to da bi tehnologija solarnih fotonaponskih modula mogla da obuhvati 16% svetske proizvodnje električne energije do 2050. godine. Dok bi toplotna energija iz koncentrovane solarne energije („concentrated solar power plants –

CSP”) doprinela sa dodatnih 11%. Tako da bi zajedno mogle da spreče emisiju više od 16 milijardi tona ugljendioksida na godišnjem nivou [20].

Tako se može zaključiti da je jedan od glavnih ciljeva EU da se u periodu do 2030. godine ušteda energije i energetska efikasnost popne na 30% i da se na taj način nadoveže na već postignute rezultate. EU kroz mnoge projekte i studije slučaja ukazuje na potrebu širenja primene solarnih sistema (kao bitnog OIE) u urbanim sredinama, čija primena daje pozitivne ekonomske i ekološke benefite i opsežno utiče na bolji komfor stanovanja. Konzorcijum PV UP-SCALE, kao i Program IEA PVPS, su neki od primera dobre prakse u primeni solarnih sistema u EU, a na osnovu kojih bi se trebale uzeti smernice za implementaciju ovakve vrste projekata kod nas. U tom smislu, u daljem podpoglavlju je analizirana primena solarnih sistema.

2.2. Primena solarnih sistema

Fotonaponski sistemi su raznovrsni i napravljeni su tako da proizvode energiju za različite vrste uređaja, počevši od časovnika pa do čitavih naselja a da pritom koriste jedan jedini izvor energije – sunčevu energiju. Pored ovoga su i jednostavne za rukovanje i tako dobijaju posebno mesto kada je u pitanju širok spektar primena. Smanjenje cene fotonaponskih ćelija je rezultat porasta proizvodnje istih, što je otvorilo veliki broj novih tržišta i novih primena. Različite vrste primena fotonaponskih ćelija (rashladni sistemi, osvetljenje, telekomunikacija) su se pokazale konkurentne na tržištu i izuzetno profitabilne u odnosu na postojeće tehnologije. Posebnu primenu su ove ćelije našle u obezbeđivanju električne energije za čitava naselja koja su u udaljenim oblastima. Ove ćelije su i deo fotonaponskih sistema koje mogu da zamene građevinske elemente objekata (fasada, krov i sl.).

Proizvodnja električne energije treba da funkcioniše u skladu sa prirodnom sredinom i da joj bude od koristi. Kada je reč o globalnim promenama klimatskih uslova, solarna električna energija može da spreči promene ovih uslova dok u isto vreme povećava energetska ponudu. U gradovima se troši 75% električne energije, od toga 40% odlazi na zgrade [21].

Jedan od velikih prednosti fotonaponskih sistema jeste i ta što mogu da se instaliraju u različite vrste objekata, od onih manjih kao što je autobuska stanica pa sve do onih većih kao što su velike poslovne zgrade i aerodromi. Postoje izmerene tačne količine fotonaponskog učinka u objektima. No, uprkos tome, treba da se pažljivo definiše faktor količine sunčevog zračenja koje pada na taj objekat i još neki dodatni faktori kao što je električna stabilnost elektrodistributivne mreže. Iako je ovo trenutno nemoguće, fotonaponski sistemi imaju velike mogućnosti. Ugradnjom ovakvih sistema, svaki objekat, naročito zgrade, može da se transformiše u male proizvođače električne energije. Fotonaponski sistemi iz nekoliko aspekata mogu da budu od opšte koristi kada se integrišu u građevinske elemente [21]:

- 1) Mogu se koristiti u gusto naseljenim sredinama budući da ne zahtevaju dodatni prostor;
- 2) Vezano za prethodnu stavku, ovakvim sistemima nisu potrebne dodatne instalacije, neophodne za njihovo funkcionisanje;

- 3) Ovakvi sistemi solarnu energiju pretvaraju direktno u električnu tako da im nije potrebno dodatno skladištenje ili akumulacija;
- 4) Smanjuju isplanirane troškove ulaganja;
- 5) Izuzetno su fleksibilni i lako se povezuju sa drugim instalacijama i sistemima u zgradi;
- 6) Smanjuju opterećenje električne mreže time što obezbeđuju električnu energiju kada je potražnja najveća;
- 7) Na inovativan način stvaraju mogućnost za nove estetske kreacije;
- 8) Mogu da imaju dvostruku ulogu time što zamenjuju konvecionalni građevinski materijal i da se tako višestruko isplate.
- 9) Instalacija ovakvih sistema na zgradama zadovoljava standarde u projektovanju i u građevinskoj industriji generalno.

Prednost korišćenja FN solarnih sistema je u njihovoj raznovrsnosti i brzom razvoju, njihova napredna tehnologija je omogućila sisteme bez dodatne instalacije i potrebe za dodatnim prostorom. Napravljeni su iz razloga da omoguće energiju za različite vrste uređaja, a pri tom koriste jedan jedini izvor energije—sunčevu energiju, mogu da se instaliraju u različite vrste objekata i mogu da se transformišu u male proizvođače električne energije dok instalacije prerastaju u standard projektovanja objekata. To se može videti na primerima njihove primene u gradovima EU.

2.3. Primena fotonaponskih (FN) sistema u gradovima u EU

Opšta javnost je oduvek bila upoznata sa potencijalom kojim solarna energija raspolaže. Ono što je ograničavalo široku primenu solarne energije bila je cena solarne tehnologije. Sada to ne predstavlja prepreku budući da je cena solarnih FN sistema u naglom padu. Samim tim, ova tehnologija postaje izuzetno konkurentna na tržištu u odnosu na druge tehnologije. Konkretni podatak je taj da je cena panela od multikristalnog silicijuma pala za 22% 2013. godine u odnosu na prethodnu [20]. Solarna FN tehnologija je postala izuzetno konkurentna na nemačkom tržištu i ovde su troškovi proizvodnje električne energije iz solarnih elektrana niži od troškova električne energije kada je krajnji kupac u pitanju. Nemačka je pravi primer tržišta gde je cena tehnologije sve manja dok raste nivo primene FN sistema. Time se dolazi do stvaranja jednog zrelog tržišta koje se kreće u pravcu najpovoljnijih i najpristupačnijih sistema. Ipak, ako izuzmemo nemačko tržište, ne ostaje nam mnogo tržišta gde se pruža adekvatna nadoknada za intenzivnije ulaganje u solarnu fotonaponsku tehnologiju. Razlika u ceni između cena solarne tehnologije i ostalih konvencionalnih tehnologija mora biti smanjena i tek tada solarna energija može učestvovati u trci sa sadašnjom proizvodnjom i da postane pravi konkurent [20].

Implementacija FN sistema je mnogo brža nego što se to očekivalo naročito u urbanim sredinama Grčke, Francuske, Nemačke, Italije i Velike Britanije. Štaviše, mnoge zemlje su već postigle svoje strateške ciljeve za solarnu FN tehnologiju za period do 2020. Ova brza implementacija se može objasniti na dva načina. Prvi razlog je taj što je implementacija fleksibilna i unosna. Drugi je pak taj što su ciljevi vezani za solarnu tehnologiju u mnogim zemljama skromni. Jedino Nemačka i Španija nisu potcenile potencijal

solarne tehnologije u svojim akcionim planovima. Celokupan potencijal solarne FN energije u Evropskoj uniji je iznosio 80 GW [16,20].

Vrednost investicionih ulaganja u solarnu FN tehnologiju je izložena brojnim rizicima. Samo neki od rizika jesu oni regulatorni, operativni, tržišni, i naravno rizici same izgradnje. Jedna od najvažnijih mera jeste da se svi ovi rizici raspodele i tako postanu transparentni svima onima koji žele da ulažu. Drugim rečima, investitori treba da dobiju jasan i pouzdan znak od strane onih koji kreiraju regulatorne okvire. Time će im biti stavljeno do znanja da je smanjen rizik izgradnje projekata da mogu da se razvijaju. Ovde možemo citirati Mariju van der Hoven iz „Međunarodne agencije za energetiku”: „od kada postoji evidencija o političkoj nekoherentnosti, zbunjujući signali i kreni-stani politički ciklusi dovode da toga da investitori na kraju više plaćaju svoje investicije, dok potrošači skuplje plaćaju utrošenu energiju, a neki projekti se jednostavno neće nastaviti“ [16].

U sprovođenju nacionalnih ciljeva za solarne tehnologije organizovani su mnogi projekti za projektovanje i implementaciju što većeg fonda fotovoltaike, koji su uključivali sve moguće rizike pre i posle same implementacije solarnih sistema, a među kojima su Konzorcijum PV UP-SCALE, kao i Program IEA PVPS [22,23] .

Fotonaponski (FN) sistemi u urbanim politikama (PV-UP-SCALE) je strateški i sveobuhvatan pristup za dugoročno proširenje, odnosno projekat koji se finansira iz Evrope u okviru programa Inteligentna energija za Evropu (ugovorni broj EIE / 05/171 / SI2.420208) koji se odnosi na veliku implementaciju fotovoltaike (FN) u evropskim gradovima. Njegov cilj je da skrene pažnju da su akteri u procesu urbanog razvoja ekonomski pokretači, koji će rešavati mnoge probleme, poput problema sa mrežom i šta treba uraditi u FN procesu. Organizovane su radionice za donošenje odluka o urbanim potrebama i napisan je priručnik o kvalitetu koristeći iskustva stečena FN-projektima. Urbani projekti su rađeni u Holandiji, Nemačkoj, Francuskoj, Španiji i Velikoj Britaniji [22].

Tokom projekta učesnici su radili sa grupama zainteresovanih strana koje razmatraju stvarne ili potencijalni FN projekti u njihovom području. To je dovelo do pripreme i objavljivanja studija slučaja koji pružaju detaljan pogled na procese koji su uključeni u izradu FN projekta u gradovima. Studije slučaja su zatim korišćene za utvrđivanje zajedničkih faktora uspeha, problema i rešenja. Prikazana je grupa pripremljenih studija slučaja, obrasci i grupe problema, barijera i rešenja koja se ne mogu pokazati iz jedne Studije slučaja. Različiti projekti u različitim fazama razvojnog procesa pružili su dragoceni pregled problema tokom celog životnog veka projekta [22].

Projekat dopunjuje aktivnosti koje se provode u Međunarodnoj agenciji za energiju. Posebno se provodi sporazum o sprovođenju Programa fotonaponskih elektroenergetskih sistema (IEA PVPS). Učesnici PVPS-a provode različite zajedničke projekte u primeni pretvaranja fotonaponske solarne energije u električnu energiju. Cilj je pojačati međunarodne kolaborativne napore koji olakšavaju ulogu fotonaponske solarne energije kao kamen temeljac u tranziciji ka održivim energetske sistemima. Trenutno je u okviru IEA PVPS programa uspostavljeno sedam istraživačkih projekata, takozvanih zadataka [23] .

Može se zaključiti da opseg zemlje, faze razvoja i uključene zainteresovane strane, je dovelo do prikupljanja sveobuhvatnog skupa naučenih lekcija i uspešnih metoda promovisanja primene solarnih FN sistema u procesu razvoja gradova. Sve informacije su poduprte detaljnim studijama slučaja. Od mnogobrojnih projekata i studija slučaja,

interesantni za naš predmet rada i implementaciju solarnih sistema na fasade objekata, izdvajajamo:

1. Studija slučaja- Stambeni objekti za solarnu energiju u Severnoj Rajni-Vestfaliji (NRW), projekat Köln-Bocklemünd, (PV UP-SCALE, www.50-solarsiedlungen.de) [24];
2. Projekat stambenog kompleksa „Pal Town Josai-no-Mori”, u Ota City, Gunma Prefektura u Japanu, (IEA-PVPS-Task 10 Community-Scale PV: Real Examples of PV Based Housing and Public Developments, www.pvupscale.org) [25];
3. Projekat La Darnaise, Grand-Lyon konurbacije u Francuskoj, (IEA-PVPS-Task 10 Community-Scale PV: Real Examples of PV Based Housing and Public Developments, www.pvupscale.org) [26].

O ovim projektima će biti više reči u sledećem podpoglavlju.

2.4. Primeri dobre prakse primene solarnih FN sistema u gradovima EU

U uvodnom delu ovog poglavlja, pomenuto je da u sprovođenju nacionalnih ciljeva za primenu solarne tehnologije, u EU su organizovani mnogi projekti za projektovanje i implementaciju što većeg fonda fotovoltaike, koji su uključivali sve moguće rizike pre i posle same implementacije solarnih sistema, a među kojima su Konzorcijum PV UP-SCALE, kao i Program IEA PVPS, a o kojima će dalje biti reči.

2.4.1. Fotonaponski (FN) sistemi u urbanim politikama (PV-UP-SCALE)

U okviru projekta PV UP-SCALE izvršen je širok opseg pregleda urbanih područja gde je završena ili planirana ugradnja značajnih količina fotovoltaike. Cilj je bio da se identifikuju zajednički faktori uspeha i potencijalni problemi. Učesnici PV UP-SCALE radili su sa preko 100 različitih aktera od kreatora politike do inženjera, arhitekti i samih stanara u šest zemalja radi prikupljanja svojih iskustava i mišljenja u pogledu primene velikih FN fonda u okviru razvoja urbanih područja. Uključena urbana područja kretala su se od onih u kojima su prioriteti i planovi za to područje još uvek da budu oblikovani na područja na kojima je instaliran solarni FN sistem pre više od 10 godina do područja novih objekata primene najnovije solarne tehnologije. U svim oblastima količina solarnih sistema je bila značajna, a znatno je uticao na područje gde se nalaze. Opseg zemlje, faze razvoja i uključene zainteresovane strane, bio je izuzetno širok i to je dovelo do prikupljanja sveobuhvatnog skupa naučenih lekcija i uspešnih metoda promovisanje primene FN sistema u procesu urbanog razvoja [22] .

U mnogim dešavanjima projekta, na kojima je instaliran solarni FN sistem odluka je doneta u kasnoj fazi, dugo nakon popravljavanja izgleda lokacije. U mnogim slučajevima odabranih područja na kojima bi se FN mogao instalirati na osnovu predmetnog razvojnog mesta, desilo se da imaju dobar solarni raspored. Druge dostupne lokacije zbog FN nisu bile pogodne, jer faktori koji su uticali na projektovanje, dizaj i implementaciju nisu uzeti u obzir u ranijoj fazi. Ako ne počnemo ranije da uzimamo u obzir prilikom planiranja: pristup suncu, proporciju zgrade, orijentacija fasada zgrade u odnosu na sunce, klimu područja,

konfiguracija terena, vetar i međusobni položaj zgrada (bioklimatski faktori), zgrade koje mogu koristiti solarnu energiju, koristeći delić onoga što je moglo biti [22].

Na osnovu rečenog, zaključak bi bio da ispitivane studije slučaja se nalaze se u različitim zemljama. Proces urbanog planiranja varira dramatično u različitim zemljama i da je ovisan o mnogim faktorima, među kojima su bioklimatski faktori. Zajednički cilj projekta je smanjenje energetske potrebe solarnim metodama gradnje, a s druge strane pokrivanje preostalih potreba za energijom. Prethodno rečeno, se može sagledati na primeru Studije slučaja u Nemačkoj-Stambeni objekti za solarnu energiju u Severnoj Rajni-Vestfaliji (NRW), tj. na jednom od projekata-Köln-Bocklemünd (NRW), gde su na fasadama zgrada i na krovu implemenitirani solarni FN sistemi, koji su interesantni za naš rad.

2.4.1.1. Studija slučaja-Stambeni objekti za solarnu energiju u Severnoj Rajni-Vestfaliji (NRW)

Krajem 90-ih vlada države Severne Rajne-Vestfalije (NRW) i Agencija za energetiku NRW, pokrenuli su kampanju za izgradnju 50 stambenih objekata solarne energije u Severnoj Rajni-Vestfaliji (NRW) [www.50-solarsiedlungen.de] [24].

Cilj projekta je bio, s jedne strane, uveliko smanjenje energetske potrebe odgovarajućim solarnim metodama gradnje, a s druge strane pokrivanje preostalih potreba za energijom u većem delu. Ministarstva su koordinirala programe subvencioniranja za ovaj projekat. Kampanja je postavila posebne zahteve za izgradnju stambenih objekata sa solarnom energijom [24] :

- 1) Potrošnja toplotne energije: max. 15 kWh / m²a (standard pasivne kuće) ili max. 35 kWh / m²a.
- 2) Proizvodnja tople vode: Doprinos solarne energije treba da bude najmanje 60% energetske potrebe.
- 3) Proizvodnja električne energije fotonaponskim proizvodima: Najmanje 1 kWp po stambenoj jedinici.

Najmanje dva od tri zahteva morala su da budu ispunjena da bi se stekao status „stanovanja sa solarnom energijom“. Jedan od projekata je bio projekat Köln-Bocklemünd, NRW [24].

U Köln-Bocklemünd-u, Državna kompanija za razvoj "Landes-entwicklungsgesellschaft" (LEG) i Socijalno stambeno preduzeće "Antoniter Siedlungsgesellschaft" (ASG), modernizovali su tipično višespratno stambeno naselje izgrađeno 60-ih godina. Realizacijom projekta, potreba za grejanjem smanjuje se za više od 50% obnavljanjem fasada i izolacijom podrumskih plafona. Modernizovane zgrade LEG koriste u budućnosti ne samo manje grejne energije, već će proizvoditi i električnu energiju. Veliki fotonaponski paneli integrisani su u fasade i pričvršćeni su na balkonske ograde. Ostali FN moduli su instalirani na krovovima. Zgrade ASG koriste solarnu energiju sa solarnim termičkim kolektorima za toplu vodu. Ovde se pored toga solarni aspekti reorganizacije izvode obojenim PV sistemom u fasadi. Solarni sistemi su postavljeni na 640 stambenih jedinica, čiji su zahtevi za grejanje iznosili 59 - 67 kWh / m²a [24].

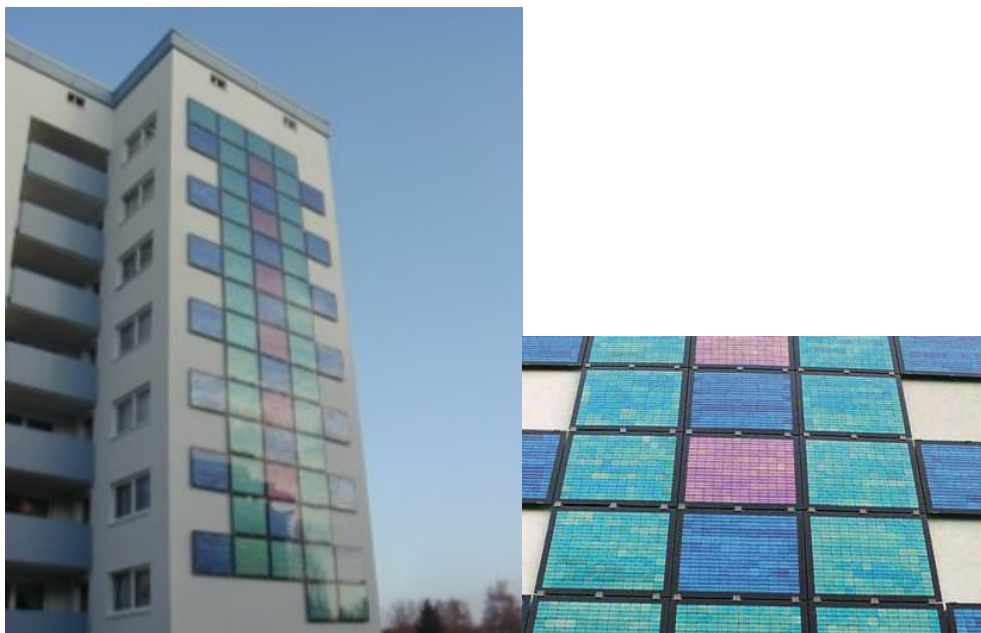
Fotonaponska instalacija obuhvata vrhunski kapacitet od 150 kW (1500 m²) na zgradama LEG-a (slike 2.1 i 2.2) i kolorisane FN instalacije kapaciteta 9,3 kW na ASG zgradi (slika 2.3), dok sunčani kolektori zauzimaju 112 m² površine zgrade ASG [24].



Slika 2.1. Zgrada „Köln, Börnerstraße“ (LEG) [www.50-solarsiedlungen.de] [24]



Slika 2.2. Montaža solarnih FN modula na fasadi zgrade (LEG) [www.50-solarsiedlungen.de] [24]



Slika 2.3. Kolor fotonaponske instalacije na zgradi (ASG) [www.50-solarsiedlungen.de] [24]

U Nemačkoj, studije slučaja pokazuju spremnost od strane nekih opština da naruče detaljne analize i simulacije senčenja zgrada razvojnog područja i rezultate iskoristite za informisanje graditelja i dizajnera. Na primer, u nekim razvojnim područjima razvojni plan je uključivao simulaciju zasenčenja i sunčevog zračenja na građevinskim površinama. Da bi se izbeglo veće zasenčenje površina zgrade, savetodavni odbor formiran je da pomogne pojedinačnim investitorima kako bi solarni FN sistem imao maksimalni efekat [24].

Projekat „50 solarnih stambenih naselja na severu Rajna-Vestfalija“, ima za cilj kombinovanje energetske efikasnosti i korišćenje solarnih FN sistema kao obnovljivog izvora energije u izgradnji stanova. Na imanju sa solarnim pogonom je omogućen veći nivo komforanog stanovanja, primenom solarne energije omogućena je veća efikasnost. Ovim projektom se daje podrška u daljoj primeni solarne zgrade i energetske zgrade.

2.4.2. Program IEA PVPS (IEA Photovoltaic Power System Program (PVPS))

Ovo je drugi predloženi program projektovanja i implementacije solarnih FN sistema zgrada u urbanim sredinama, o kojem je bilo govora u uvodnom delu ovog poglavlja. IEA Photovoltaic Power System Program (PVPS) jedan je od sporazuma o saradnji u istraživanju i razvoju uspostavljenih u okviru IEA-e (Međunarodna agencija za energetiku), a od svog osnivanja 1993. godine. Cilj je pojačati međunarodne kolaborativne napore koji olakšavaju ulogu fotonaponske solarne energije kao kamen temeljac u tranziciji ka održivim energetskim sistemima. Trenutno je u okviru IEA PVPS programa uspostavljeno sedam istraživačkih projekata, takozvanih zadataka. Za naš rad je od interesa zadatak 10, koji dobija informacije iz zadatka 7 (integrirani PV), koji je završen 2001. godine i zadatak 5 (pitanja mreže), koji je završen 2003. godine [23].

Cilj IEA PVPS zadatka 10 je da poveća mogućnosti za široku primenu foto-naponske proizvodnje električne energije u gradskom okruženju, kao deo integrisanog pristupa koji maksimizira energetska efikasnost zgrade i solarnu toplotnu i fotonaponsku upotrebu. Analiza vrednosti, podsticaji politike, alati za analizu, kao i dizajn i integracija sistema koji su se pokazali uspešnim u zemljama učesnicama IEA PVPS biće razvijeni u najvećoj mogućoj meri u jedinstven međunarodni skup alata za globalno tržište.

To će se postići putem [23]:

- uspostavljanje veze između građevinske industrije i dizajna,
- iznošenjem preporuka zainteresovanim stranama, uklanjanjem barijera za preuzimanje fotonaponskih materijala na masovno tržište,
- razvoj komponenti sistema, dizajna i primena sa najvećim potencijalom prodora na globalno tržište, uključujući estetske vrednosti kao i mehaničke i energetske vrednosti,
- širenje uspešnih alata (modeli, putokazi, vodiči, sistemska integracija itd.) i analiza relevantna za potrebe rastućih svetskih tržišta,
- identifikovanje praznina u trenutno dostupnim informacijama i razvoj proizvoda za popunjavanje tih praznina,
- razvijanje materijala i održavanje događaja namenjenih zadovoljavanju potreba određenih grupa zainteresovanih strana,
- pružanje kontinuirane komunikacije, promocije i obrazovanja tokom perioda zajedničkog projekta.

Dugoročni cilj zadatka je da fotonaponski uređaji u urbanim razmerama budu poželjna i uobičajena karakteristika urbanog okruženja u zemljama članicama IEA PVPS [23].

Nakon priloženog, može se zaključiti da odabrani Program IEA PVPS zadatak 10, odnosi se na povećanje mogućnosti za što širu primenu foto-naponske proizvodnje električne energije u gradskom okruženju, kao deo integrisanog pristupa koji maksimizira energetska efikasnost zgrade i solarnu toplotnu i fotonaponsku upotrebu, samim tim stvara bolji komfor stanovanja. Prema tome, iz Programa IEA PVPS zadatak 10, su predložena dva projekta koja su od interesa za naš rad, a o kojima će dalje biti reči u narednom podpoglavlju :

1. Projekat solarnog stambenog kompleksa „Pal Town Josai-no-Mori”, u Ota City, Gunma Prefektura u Japanu, (IEA-PVPS-Task 10 Community-Scale PV: Real Examples of PV Based Housing and Public Developments, www.pvupscale.org) [25];
2. Projekat solarnog stambenog kompleksa La Darnaise, Grand-Lyon konurbacije u Francuskoj, (IEA-PVPS-Task 10 Community-Scale PV: Real Examples of PV Based Housing and Public Developments, www.pvupscale.org) [26].

2.4.2.1. Projekat solarnog stambenog kompleksa „Pal Town Josai-no-Mori”, u Ota City, Gunma Prefektura u Japanu (IEA-PVPS-Task 10)

U ovom solarnom projektu (u okviru Programa IEA-PVPS-Task 10) , veliki broj solarnih fotonaponskih sistema je instaliran na krovove kuća, stambenog kompleksa „Pal

Town Josai-no-Mori”, u Ota City, Gunma Prefektura (slika 2.4), kao demonstrativni istraživački projekat, kojeg je naručila japanska državna Organizacija za novu energiju i industrijski tehnološki razvoj (NEDO), a svi solarni FN sistemi su priključeni na električnu mrežu kao klaster (tj. grupisani FN sistemi). Ovo demonstrativno istraživanje ima za cilj da proceni performanse i sposobnosti solarnih FN sistema, ispita njihov negativan uticaj na distributivne vodove, i razvija tehnologiju za rešavanje potencijalnih problema. Solarni fotonaponski sistem u ovom projektu je instaliran na 553 kuća i ukupnog kapaciteta je 2 310kW, i jedan je od svetskih najvećih stambenih okupljenim fotonaponskih sistema povezan sa jednom distributivnom linijom. Projekat se realizuje u saradnji sa Tokyo Electric Power Co., Ltd., R&D konzorcijumom u organizaciji projekta kompanije, itd [www.pvupscale.org] [25].

U cilju promovisanja uvođenja fotonaponskih sistema na razuman način, ovaj projekat ima za cilj da razvije opštu tehnologiju, što će sprečiti potiskivanje izlaza grupisanih FN sistema, uzrokovanih viškom napona na distributivni sistem, i da pokažu svoju efikasnost koristeći stvarne instalirane grupisane FN sisteme [25].

Proizvedena izlazna snaga se koristiti za napajanje kuća u stambenim fotonaponskim sistemima a višak snage se isporučuje na električnu mrežu. Napon u distributivnom skladu raste sa povećanjem viška izlazne snage i napona, pa ponekad prelazi operativni domet. FN sistemi imaju ugrađenu funkciju za smanjenje svoje proizvodnje kada napon dostigne gornju granicu operativnog opsega radi sprečavanja prenapona. Međutim, ovaj fenomen se često javlja kod grupisanih solarnih FN sistema i supresija izlaza može značajno smanjiti efikasnost sistema. Da bi se rešio ovaj problem, ovaj projekat ima zadatak da razvije jedan "izlazni sistem izbegavanja suzbijanja " koji koristi bateriju kao skladištenje energije. Višak snage, koja se može potisnuti u konvencionalnim sistemima, biće sačuvana u bateriji. Ovaj izlazni sistem za izbegavanje suzbijanja viška snage, će omogućiti FN sistemima da generišu svoju maksimalnu izlaznu snagu čak i kada su grupisani [25].

Centralizovani sistem kontrole koji će kolektivno kontrolisati FN sisteme na osnovu podataka kao što je količina energije proizvedene od strane fotonaponskih sistema, količina punjenja akumulatora / pražnjenja, i količina utrošene energije, biće razvijen. Očekuje se da će takva centralizovana kontrola poboljšati ukupnu efikasnost u oblasti u kojoj su klaster FN solarni sistemi, ali i značajno poboljšati performanse. Nadalje dobijeni podaci će se koristiti za dijagnostikovanje veka trajanja baterije i olakšati rano otkrivanje kvara sistema [25].



Slika 2.4. Solarni fotonaponski sistem instalirani na krovove kuća, stambenog kompleksa „Pal Town Josai-no-Mori”, u Ota City, Gunma Prefecture, u Japanu, (www.pvupscale.org) [25]

Pored navedenog, može se reći da je analizirani projekat jedan od svetskih najvećih stambenih okupljenih fotonaponskih sistema povezanih sa jednom distributivnom linijom. Uostalom, cilj ovog projekta je razvijanje opšte tehnologije, radi sprečavanja potiskivanja izlaza grupisanih FN sistema, uzrokovanih viškom napona na distributivni sistem, i da pokažu svoju efikasnost koristeći stvarne instalirane grupisane FN sisteme.

2.4.2.2. Projekat solarnog stambenog kompleksa La Darnaise, Grand-Lyon konurbacije u Francuskoj, (IEA-PVPS-Task 10)

Drugi projekat (u okviru Programa IEA-PVPS-Task 10), odnosi se na opštinu Vénissieux, Grand-Lyon konurbacije, koja je druga po veličini u Francuskoj, sa velikim brojem socijalnog stanovanja i industrijske raznovrsnosti. Ime ovog grada je, nažalost, još uvek povezano sa društvenim i gradskim neredima koji su se desili na ovim prostorima još od 1960-ih. Danas, Vénissieux oblast, je jedna od prioriteta Grand-Lyon-a u odnosu na velike urbane regeneracije i poboljšanje kvaliteta života stanovnika. La Darnaise okrug (slika 2.5) je konkretna ilustracija mogućnosti da transformiše stare socijalne stambene površine u energetski efikasnu i energetski obnovljivu snažnu oblast [www.pvupscale.org] [26].

Iako su svi solarni FN moduli u vlasništvu istog vlasnika, lokalne organizacije socijalnog stanovanja, ovaj projekat je sastavljen od jedanaest nezavisnih FN sistema, po jedan za svaku zgradu, koji imaju sopstveni priključak na mrežu i sopstveni ugovor za povezivanje na mrežu. Sva proizvodnja se ubrizgava u mrežu elektro-distribucije i prodaje se po feed-in-tarifi (0.145 € / kWh). Feed-in tarife su predviđene podsticajne otkupne cene po proizvedenom kWh iz (OIE) koje su usklađene sa tehnologijom koja se primenjuje i koje Vlada svake zemlje propisuje na određeni vremenski period kako bi podstakla investitore i smanjila rizik investicije [26].

Visoke zgrade obično nude ograničene krovne površine koje mogu biti pogodne za FN solarne sisteme, pogotovo kada je u pitanju ravan krov, koji se takođe koristi za solarne termale, za proizvodnju i električne i toplotne energije, što je slučaj ovog projekta. Arhitekta ovog projekta, Bernard Paris, i vlasnik zgrade, odlučili su da se solarni FN sistem ne instalira na krovovima, već da se integrišu na južnoj fasadi svake zgrade, iako godišnji prinos snage FN solarnih panela na fasadama je niži od godišnjeg prinosa istih na krovu. U ovoj velikoj razmeri urbane regeneracije, kako nije bilo moguće da se prilagodi urbanistički plan za optimizaciju korišćenja solarnog FN sistema, isti sistem je dimenzionisan i pozicioniran na fasadama, tako da na svakoj zgradi ograniči njihovo međusobno senčenje [26].



Slika 2.5. FN solarni sistem instaliran na fasade zgrada okruga La Darnaise, Francuska, (www.pvupscale.org) [26]

Ukupni troškovi FN solarnog sistema iznose 580 000 evra (696 000 dolara), od kojih je samo jedna trećina ovog projekta plaćena od strane vlasnika zgrade, francuske Nacionalne agencije za zaštitu životne sredine i uštedu energije (ADEME) i od strane ko-Regionalnog saveta (Rona-Alpes council). Iako FN solarni sistem ima koristi od nacionalne tarife, feed-in, za proizvedenu električnu energiju od strane FN solara, vlasnik FN solarnog sistema nikada neće imati finansijsku povrat sredstava za ovaj projekat. Razlog je taj što je vlasnik FN sistema odlučio da koristi godišnji prihod od električne energije, ne da nadoknadi kredit ili da investira, već da smanji troškove usluga zgrada, kako bi povećao svoju društvenu ulogu i smanji siromaštvo stanovnika [26].

Solarni FN sistem je samo mali deo ovog masovnog projekta regeneracije, koji ima za cilj da poboljša kvalitet života stanovnika i smanji troškove usluga za poboljšanje energetske efikasnosti i korišćenja obnovljivih energetske sistema. Zgrade su opremljene prozorima i izolacijom visoke efikasnosti, daljinsko grejanje pokreće piljevinu 12 MV termoelektre i 730 m² solarnih termopanela proizvode deo domaće potrebe tople vode. To čini La Darnaise jedan od prvih okruga u Francuskoj, obnovljivog napajanja, čiji je vodeći FN solarni sistem instaliran na fasade [26].

Na osnovu datih primera dobre prakse u primeni solarnih FN sistema u EU, ciljevi su i dalje mnogobrojni, a neki od njih su: poboljšati arhitektonski kvalitet, tehnički kvalitet i ekonomsku održivost FN sistema u izgrađenom okruženju i proceniti i ukloniti netehničke barijere za njihovo uvođenje kao energetske značajnu opciju. Očekuje se da će uspešna integracija FN sistema u izgrađeno okruženje značajno doprineti budućem širenju

fotovoltaika uopšte. Potrebno je aktivno angažovanje urbanista, arhitekata i inženjera građevine i drugih stručnjaka koji se bave fotovoltaiikom. Možemo lako izdvojiti i uvideti smernice za uvođenje ovakvih projekata i ovde, vodeći se inostranim primerima u radu. Kakvo je stanje po pitanju primene solarnih sistema u Republici Srbiji, biće prikazano u narednom podpoglavlju.

2.5. Elektroenergetika i iskorišćenost obnovljivih izvora energije u Republici Srbiji

Na osnovu analiziranog bogatog iskustva u pogledu primene i proizvodnje solarne i električne energije u EU, postavlja se pitanje kakvo je stanje u Republici Srbiji u tom kontestu.

Intezivno korišćenje solarne energije i drugih obnovljivih vrsta energije će u Republici Srbiji zavisiti od toga kako se sprovodi “Nacionalni program obnovljivih izvora energije” i na koji način su njegove odrednice podržane od strane društva. U Srbiji broj sunčanih sati iznosi preko 2.000 časova što je viša cifra u odnosu na broj sunčanih sati u ostalim evropskim zemljama ali je visoka i cena FN panela. Dakle, iako je prisutan sveopšti napredak tehnološkog stanja i funkcionalnih performansi u proizvodnim postrojenjima i objektima, od presudnog je značaja da se uspešno sprovede program tehnološke modernizacije proizvodnih prostorija. Time ćemo obezbediti sigurno i ekonomično snabdevanje građana i privrede toplotnom i električnom energijom. Postoje i programi za racionalno korišćenje energenata, za povećanje energetske efikasnosti od mesta proizvodnje do mesta potrošnje i programi za pojačanje korišćenja obnovljivih izvora energije u razvoju koji su dostupni u Republici Srbiji. [27]

U oblasti privrednog i energetskog razvoja Srbije, investicija u obnovljive izvore energije tek treba da dobije značajno mesto. To trenutno nije moguće usled relativno jeftine električne energije i zbog činjenice da ni stručnjaci ni javnost u Srbiji nije dovoljno upoznata sa problematikom i prednostima koju donosi upotreba obnovljivih izvora energije. Iz toga proizilaze i činjenice da postoji generalna neupućenost u različite raspoložive tehnologije, kao i nedovoljno jasni pokazatelji ekonomskih i ekoloških faktora šire primene ove tehnologije. Komparativna analiza koja treba da se sprovede bi nam svakako dala više informacija o periodu isplativosti nakon uvođenja novih tehnologija. Treba spomenuti i to da su početna ulaganja za gradnju objekata koji koriste obnovljive izvore energije, zajedno sa uređajima i instalacijam, izuzetno visoka [27].

Kako bi se stvorili preduslovi za korišćenje i ulaganje u zelenu energiju, moramo prvo oformiti stratešku i političko-zakonodavnu atmosferu koja će podržati korišćenje obnovljivih izvora energije. Gore pomenuta Strategija razvoja energetike Republike Srbije pruža nam određena predviđanja u kojima se kaže da će se u narednoj deceniji uspostaviti inovativni kvalitet novog stanja za vršenje energetske delatnosti. Ovakvom politikom Republike Srbije zaključeni su i definisani okviri na polju institucionalnih, zakonodavnih, ekonomsko poslovnih i strukturno organizacionih delovanja. Ovim putem se planira da energetika Republike Srbije se uspešno priključi integraciji u regionu i u Evropi [27].

Ekonomija Republike Srbije je podlegla neracionalnoj potrošnji električne energije, naročito usled svakodnevnog uvoza ove energije u zimskom periodu (potreba Republike Srbije za uvoznim energentima je 43%). Ovakav rast energetske potrošnje će negativno uticati i na privredni rast, tako da će se Republika Srbija suočiti sa višestruko nižim društvenim proizvodom u odnosu na razvijene zemlje istočne i centralne Evrope. Kao posledica svega navedenog, na godišnjem nivou se u atmosferu ispusti više od 300.000 tona sumpor dioksida i više od 44 miliona tona ugljen dioksida. Veoma je moguće da će se energetska zavisnost Republike Srbije i dalje povećavati, jer se procenjuje da će uvoz nafte u Srbiju dostići 4,7 miliona tona do 2020. godine. [27]

Na isti način, nije doneta strategija niti je razmatrano od strane države ulaganje u alternativne izvore energije. Time bi se svakako smanjila energetska zavisnost i podstakao razvoj obnovljivih izvora energije. Stvaranje kvalitetnih programa za privlačenje domaćih i stranih investicija uglavnom kasni usled postojanja nepovoljnih zakonskih regulativa, nedovoljno razvijenih strategija razvoja i nepostojanja stimulacije od strane države za proizvodnju i potrošnju obnovljivih izvora energije. Tek kada se ispune ovi uslovi, možemo započeti izgrađivanje novih i dograđivanje postojećih objekata za proizvodnju obnovljivih vrsta goriva. [27]

I pored činjenice da Srbija raspolaže značajnim potencijalima za stvaranje i korišćenje obnovljivih vrsta energije, dosadašnja proizvodnja obnovljivih goriva je neznatna. Ostvarenje ovih potencijala bi dovelo do toga da se energetska zavisnost zemlje smanji i da se značajno utiče na smanjenje efekata staklene bašte (što predstavlja posledicu emisije štetnih gasova). Zašto se kasni sa razvojem obnovljivih izvora energije? Primarni razlozi su svakako slab intezitet državnih stimulansa i nedovoljno razrađene regulative.

I u onim zemljama koje najbrže tehnološki napreduju i ostvaruju najveći dohodak po jedinici utrošene energije, postajući na taj način energetski sve efikasnije, povećava se proizvodnja i potrošnja energije po stanovniku. Prema proceni Međunarodne agencije za energetiku (IEA), u periodu od 2005. do 2025. godine očekuje se uvećanje potrošnje primarne energije za 40% [27]. Zbog toga je neophodno da se razvoj energetike strateški planira i detaljno analizira sa svih aspekata, kako onih opšte-razvojnih, tehnološko-ekonomskih, tako i socijalnih, ekoloških i drugih.

Danas je izvesno da energetika predstavlja sektor ekonomije koji ima najveći negativni uticaj na životnu sredinu, a njena zasnovanost dominantno na konvencionalnim izvorima energije predstavlja realnu pretnju po održivost privrednih tokova. Neobnovljivost najkomercijalnijih i najdostupnijih energenata današnjeg sveta (ugalj, nafta i gas) je vrlo bitna karakteristika svetske energetike koja utiče na održivu budućnost, odnosno na mogućnost sadašnjih generacija da ostvare ekonomski rast i razvoj, ne uskraćujući tu mogućnost budućim generacijama .

Veliki broj mera za podsticanje investiranja u objekte sa obnovljivim izvorima energije je donet u strateškom razvoju energetike Republike Srbije u periodu do 2025. godine. Potencijal korišćenja ovih mera je definisan „Programom ostvarivanja strategije razvoja energetike”. Ovim akcijama se gradi dobra osnova za definisanje “Nacionalnog programa za stimulaciju korišćenja obnovljivih izvora energije” [27].

U ovom trenutku, Srbija ima zanemarljiv instalisani kapacitet u odnosu na kapacitet koji je država sebi postavila kao cilj u narednih pet godina. Sadašnji kapacitet obnovljivih

energetskih izvora u pogonu iznosi 58,5 MW i to predstavlja 0,82% od sveukupnog instaliranog kapaciteta elektroenergetskog sistema Srbije. U malim elektranama se proizvodi 34,86 MW, proizvodnja solarnih FN sistema smeštenih na zemlji iznosi 5,34 MW, solarni FN sistemi na zgradama proizvode 2,61 MW, energija vetra proizvodi 500 kW, postrojenja na biogasu proizvode 4,86 MW i od kogeneracija nam dolazi 10,33 MW. Iako biomasa zauzima dobar položaj u „Nacionalnom akcionom planu za obnovljive izvore energije“, trenutno ne postoji niti jedan projekat u fazi rada ili izgradnje koji je na biomasu. Da se podsetimo još jednom, biomasa zauzima povlašćeni status jer je njen udeo u ukupnom potencijalu za obnovljivu energiju u Republici Srbiji 60% [27].

Mora se, takođe, ostvariti i povećanje kvote koju ispunjavaju solarni FN projekti na godišnjem nivou, s obzirom na to da dopušta samo 6 MW za instalaciju na zemlji i 4 MW za instalaciju na objektima. Ova kvota je očigledno isuviše mala za Republiku Srbiju, brzo se ispuni, tako da sada imamo nekoliko solarnih FN projekata u procesu razvoja van kvote određene od strane vlade Republike Srbije.

Na osnovu datih informacija možemo zaključiti da ukupna kvota od 10 MW ograničava potencijalni kapacitet koji može da pruži solarna tehnologija sa fotonaponskim efektom. Tačnije, kapacitet se smanjuje tako što se ograničava mreža u kojoj je on integrisan. Isti je slučaj i sa energijom vetra, iako još nije definisana niti metodološki podeljena procena kapaciteta ovakvih nastupnih izvora kao što su sunce i vetar. Nadamo se da će pad cene solarne tehnologije povećati njen uticaj u proizvodnoj strukturi električne energije. Kada se bude uspostavilo zrelo tržište, doći ćemo i do porasta efikasnosti tehnologije i šire upotrebe solarnih panela. To bi dalo sledeće rezultate:

- 1) Razlika koja postoji između cene inovativnih proizvodnih tehnologija i cene solarnih tehnologija bi potpuno nestala;
- 2) Broj mera podsticaja za razvitak solarne energije bi se smanjile;
- 3) Došlo bi do smanjenja ograničenja i tarifa vezanih za proizvodnju solarne energije.

Nove procene ekonomskog i tehničkog potencijala OIE će stvoriti stvarnu sliku potencijala koju ima eksploatacija obnovljivih izvora u Republici Srbiji. Time ćemo dobiti jasnije predstavljene prepreke koje ovaj potencijal blokiraju. To mogu biti:

- 1) Infrastrukturalna ograničenja;
- 2) Regulatorni rizici;
- 3) Ograničenja vezana za korišćenje zemljišta i pribavljanja dozvole;
- 4) Ograničenja iz domena zaštite životne sredine;
- 5) Ograničenja vezana za priključivanje primarnog izvora energije sa udaljenih i nepristupačnih infrastruktura.

Ako izvršimo kritički osvrt na primere primene fotonaponskih sistema u EU, uviđa se, da je svako postavljanje fotovoltaike bilo uslovljeno različitim kriterijumima. Jedan od kriterijuma koji je uslovljavao projektovanje, dizajn, pozicioniranje i ugradnju solarnih sistema i od koga je zavisilo da li će implementirani solarni sistem maksimalno funkcionisati i dati benefite u vidu energetske efikasnosti, isplativosti sistema i komfora stanovanja, jesu parametri, bitni za projektovanje objekata zasnovani na principima bioklimatske arhitekture. Ovi parametri su važni i za naš rad i o njima će biti više reči u sledećem podpoglavlju.

2.6. Parametri bitni za projektovanje objekata zasnovani na principima bioklimatske arhitekture

Analizirajući inostrane primere dobre primene solarnih sistema u urbanim sredinama u EU uvideli smo da projektovanje, izbor i dizajn, i implementacija fotovoltaike na fasade objekata je mnogo ovisila o bioklimatskim faktorima, o kojima će biti reči u ovom podpoglavlju. Kao značajan element sistema prijema sunčeve energije, odnosno ponašanja zgrada kao energetske efikasnog objekata, trebaju se uzeti u obzir prirodni faktori okruženja. To znači da takav objekat zahteva ne samo poseban način projektovanja, već na njegovu efikasnost utiče i niz faktora kao što su: odabir lokacije, konfiguracija terena, orijentacija, vetar, vegetacija, međusobni odnosi zgrada itd.

Osnovni cilj građenja prema bioklimatskim uslovima je da se ljudima obezbedi unutrašnji komfor, prijatna toplota ili hladovina uz racionalnu upotrebu energije pri građenju, eksploataciji i održavanju. Osim toga objekti moraju biti funkcionalni, zdravi, bezbedni, ekonomični i tako oblikovani da imaju i estetski značaj. Da bi se to postiglo neophodno je ispuniti određene kriterijume, pa se projektovanje objekata sprovodi po određenim pravilima [28].

Bioklimatska arhitektura je arhitektura koja je kontekstualna, odnosno prilagođena svim karakteristikama lokacije budućeg objekta. Kako svaka lokacija ima svoje specifičnosti, tako se i svaki objekat bioklimatske arhitekture razlikuje i potrebno je posvetiti se svakom objektu ponaosob kako bi se najbolje iskoristili potencijali svake lokacije. Objekat u bioklimatskoj arhitekturi postaje integralni deo svog prirodnog okruženja. Pri projektovanju neophodno je istražiti sve prirodne i stvorene uslove lokacije i njihov uticaj na kvalitet života ljudi. Osnovni ciljevi bioklimatske arhitekture su integracija zgrade sa prirodnim okruženjem i prirodnim energetske tokovima i njihovo korišćenje radi postizanja višeg komfora, bez narušavanja prirodne ekološke ravnoteže. Parametri bioklimatske arhitekture su: odabir lokacije, konfiguracija terena, orijentacija, izloženost vetru, vegetacija [28].

Na osnovu analiziranog, može se zaključiti da osnovni cilj građenja prema bioklimatskim uslovima je da se ljudima obezbedi unutrašnji komfor, uz racionalnu upotrebu energije pri građenju, eksploataciji i održavanju. Pored toga, da bi zgrada bila značajan element sistema prijema sunčeve energije, odnosno, da bi se zgrada ponašala kao energetske efikasan objekat, trebaju se uzeti u obzir prirodni faktori okruženja. Takav objekat zahteva poseban način projektovanja, a na njegovu efikasnost utiče i niz parametara, neki od njih su: odabir lokacije, konfiguracija terena, orijentacija, vetar, vegetacija, itd. Navedene parametre ćemo objasniti u narednim podpoglavljima i potkrepiti slikama na primeru kuće, studija slučaja, na brdu Vinik [29], u blizini grada Niša, u Republici Srbiji.

2.6.1. Odabir lokacije

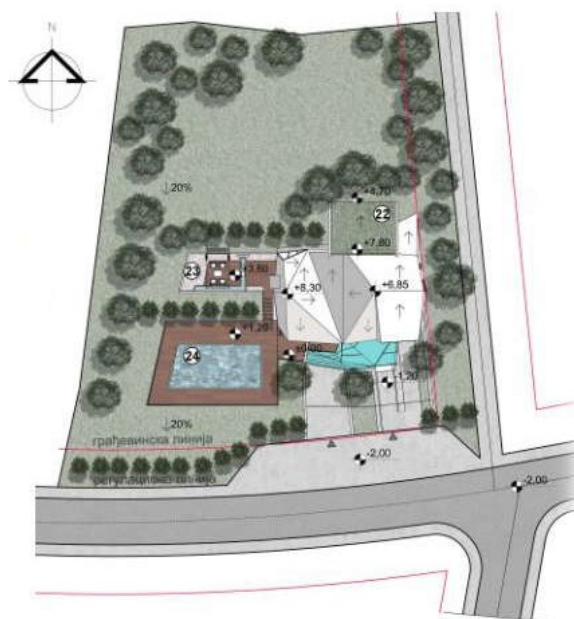
Odabir lokacije objekta je izuzetno značajan proces i uključuje celovitu analizu stvorenih i prirodnih uslova. Položaj u strukturi izgrađenog područja i prirodne i stvorene karakteristike lokacije neposredno utiču na nivo potrošnje energije domaćinstava, na nivo

stambenog komfora, kao i na održivost urbane forme u smislu podsticanja njenog rasplinjavanja ili kompaktnosti. Stoga se izbor lokacije smatra i prvom energetske relevantnom odlukom u izgradnji jedne zgrade ili urbane strukture.

Kriterijum efikasnog korišćenja zemljišta, podrazumeva i sprečavanje nekontrolisanog širenja gradova ka grinfild prostorima i podsticanje izgradnje većih gustina i mešovite namene. Na taj način, smanjuje se potreba za investiranjem u novu infrastrukturu i korišćenjem automobila, što znači i manje štetnih uticaja na životnu sredinu. Za izgradnju socijalnog stanovanja preporučuju se lokacije delimično ili potpuno okružene postojećom izgradnjom u celinama mešoviti namena, koje pružaju mogućnost ekonomičnog priključenja na osnovnu infrastrukturu i na kojima pravila građenja, ukoliko su definisana, dozvoljavaju veće gustine stanovanja. Ove smernice trebalo bi uvažiti čak i kada su za ovaj tip izgradnje iz ekonomskih razloga dostupne samo parcele u suburbanim ili rubnim gradskim područjima. Kod planiranja stambenih celina većih gustina, neophodno je predvideti i efikasan sistem grejanja, što podrazumeva blizinu toplovoda ili gasovoda, odnosno drugo adekvatno energetske održivo rešenje. Poželjno je birati lokacije sa što povoljnijim bioklimatskim uslovima, na kojima je, uz minimalna ulaganja, pažljivim planiranjem i projektovanjem stambenih objekata, moguće ostvariti značajne uštede energije i dobar stambeni komfor, uz uvažavanje sledećih smernica [28] :

- Posebno nepovoljne su lokacije koje imaju mikroklimatski niske okolne temperature, sa izrazito velikim intenzitetom vetra, sa malim zračenjem sunca, sa izrazito velikim zagađenjem vazduha i maglom;
- Idealne su padine orijentisane ka jugu, zatim jugoistoku i jugozapadu, jer omogućavaju bolju osunčanost, zaštitu od severnih vetrova, manja rastojanja objekata, a time i veću gustinu izgradnje. Takođe je povoljan ravan teren, a nepovoljne su lokacije na brežuljcima i severne padine;
- Najpogodniji oblik lokacije je pravougaonik, sa širom stranom u pravcu istok– zapad, koji omogućava izgradnju objekata duž istog pravca, tj. izlaganje veće površine objekta suncu;
- Postojanje okolnih objekata može značajno uticati na osunčanje objekata kao i na gustinu stanovanja kroz faktor rastojanja objekata.

Iz analiziranog, najpovoljniji oblik lokacije bio bi pravougaonik sa užom stranom u pravcu sever–jug, a širom stranom u pravcu istok–zapad i ulicu postavljenu u pravcu istok- zapad, što se može videti na primeru situacionog plana kuće, brdo Vinik kod Niša (slika 2.6) [29].



Slika 2.6. Primer Situacionog plana sa najpovoljnijim oblikom lokacije, brdo Vinik, u blizini grada Niša, RSrbija [29]

Prethodna istraživanja daju sledeći zaključak. Odabir lokacije objekta je izuzetno značajan proces i uključuje celovitu analizu stvorenih i prirodnih uslova, a karakteristike lokacije neposredno utiču na nivo potrošnje energije domaćinstava, i na nivo stambenog komfora. Izbor lokacije se smatra i prvom energetske relevantnom odlukom u izgradnji jedne zgrade ili urbane strukture.

2.6.2. Konfiguracija terena

Kada je izvršen odabir lokacije, na osnovu postojeće konfiguracije terena, pažljivo planiranje uređenja terena i faktora izgradnje može unaprediti ekološke i energetske uslove na lokaciji, kroz smanjenje erozije zemljišta i zagađenja vazduha, prihvatanje atmosferske vode, smanjenje efekta toplotnog ostrva, proizvodnju hrane i osiguravanje optimalnih uslova za sprovođenje principa energetske efikasnosti u projektovanju i građenju objekata.

Treba iskoristi optimalne karakteristike lokacije, a da negativne svede na minimum, što podrazumeva prethodnu analizu fizičkih faktora – klime, korišćenja zemljišta, konfiguracije, drenaže, sastava zemljišta, vegetacije, specifičnih karakteristika, itd. U odabiru lokacija za socijalnu stanogradnju, često se ne može računati na najpovoljnije bioklimatske uslove, pa je njihova optimizacija u fazi planiranja urbanističkog sklopa posebno korisna, jer ne zahteva dodatne troškove, a ostvaruje velike energetske uštede. Među faktore koji dozvoljavaju veći stepen korigovanja i prilagođavanja spadaju orijentacija, izloženost vetru i vegetacija [28].

Konfiguracija terena u velikoj meri određuje mikroklimu, a posebno temperaturni nivo, pravac i brzinu vetrova. Nekoliko metara u visinu ili stotinak metara u stranu može činiti značajnu razliku u mikroklimatskim uslovima. U dolinama i nezaštićenim položajima

na vrhu brda, prosečne temperature su po pravilu niže, a pri južnim orijetacijama padina više nego u okolnom području [28].

Prema tome, može se reći da na primeru kuće na južnoj padini brda Vinik, je izuzetno povoljna lokacija za izgradnju kuće. Ova lokacija ima nagib terena od 20%, što omogućava dužu, neometenu izloženost Suncu i veću temperaturu zbog većeg ugla između tla i sunčevog zračenja (slika 2.7) [29].



Slika 2.7. Presek objekta, uklapanje objekta u teren terasastim rasporedom masa i ukopavanjem, brdo Vinik, u blizini grada Niša, RSrbija [29].

Sa slike se uočava da je južna padina povoljna i zbog mogućnosti lakšeg ukopavanja objekta u teren i korišćenja termalne inertnosti tla kao toplotne izolacije i termalnog skladišta. Stalna temperatura pod zemljom utiče na velike uštede u zagrevanju i hlađenju stambenog prostora. Slobodni zid ka jugu može imati velike zastakljene površine za ostvarivanje solarnih dobitaka [29].

Na osnovu analize može se zaključiti. Nakon izbora lokacije, na osnovu postojeće konfiguracije terena, pažljivo planiranje uređenja terena i faktora izgradnje može unaprediti ekološke i energetske uslove na lokaciji. Konfiguracija terena treba da iskoristi optimalne karakteristike lokacije, a negativne svede na minimum. Na konfiguraciju terena utiču mnogi faktori, među njima su orijentacija, izloženost vetru i vegetacija. Ovi faktori pružaju veći stepen korigovanja i biće objašnjeni u narednom podpoglavlju.

2.6.3. Orijentacija

Orijentacija zgrade predstavlja bitan faktor kojim se još u fazi planiranja stvaraju uslovi za racionalno korišćenje energije. Ciljevi optimalne orijentacije su dovođenje do

maksimuma solarne akumulacije u toku zime i svođenje na minimum pregrevanja u toku leta. [28]

Poštovanje uslova optimalne orijentacije podrazumeva postavljanje ulica u pravcu istok–zapad i planiranje parcelacije tako da se omogući pretežno južna orijentacija širih fasada objekata. U tom smislu, neophodno je da se razmotre najpovoljniji međusobni odnosi zgrada u pogledu rastojanja i načina smicanja, pri čemu se različita varijantna rešenja primenjuju kod jednoporodične i višeporodične izgradnje. Ukoliko se u okviru jednog kompleksa planiraju objekti različite spratnosti, višespratne zgrade po pravilu se postavljaju na severnom delu lokacije [28].

Orijentacija prostorija na primeru stambenog objekta na Viniku izvršena je tako da su prostorije za dnevni boravak i spavanje orijentisane ka jugu, a kuhinja, toaleti i komunikacije su postavljene na severnoj strani. Ovim se postiže optimalno osunčanje prostorija u kojima se duže boravi, a prostorije koje se kraće koriste orijentisane su ka severu [29].

Iz analiziranog možemo zaključiti da orijentacija zgrade predstavlja bitan faktor kojim se još u fazi planiranja stvaraju uslovi za racionalno korišćenje energije, ukoliko se ispoštuju uslovi optimalne orijentacije.

2.6.4. Izloženost vetru

Planiranjem se može uticati na izloženost vetru, tako da se omogući prirodno provetravanje u letnjem periodu, a spreče toplotni gubici u ostalim periodima godine. Ukoliko prirodna konfiguracija terena ne omogućava zaštitu od dominantnih vetrova, moguće je primeniti različite urbanističke mere, poput zbijanja kuća u kompaktne celine, položaja objekata (nizovi u pravcu vetra, izbegavanje upravnog položaja frontova na pravac vetra, i sl.), primene prirodnih i veštačkih zaklona (drveće, žbunje, zidovi, nasipi) i oblikovanja (uticaj na „senku vetra”, izbegavanje pasaža). Tokom leta izloženost vetru ima povoljan efekat, hlađenja i smanjuje potrebu za veštačkom ventilacijom. U periodu grejne sezone potrebno je sprečiti uticaj vetra na fasadu objekta jer se pod dejstvom vetra povećavaju gubici toplote objekta zbog veće brzine infiltracije kroz otvore i omotač zgrade [28].

Na osnovu toga, može se reći da južna padina brda Vinik, na kojoj se nalazi analizirani objekat, predstavlja primer zaista dobre lokacije zato što prirodni reljef lokacije omogućava zaštitu od severnih vetrova koji su dominantni na teritoriji Niša. Objekat je na severnoj strani u potpunosti ukopan u teren i zaštićen od vetrova vegetacijom (slika 2.8.) [29]

.

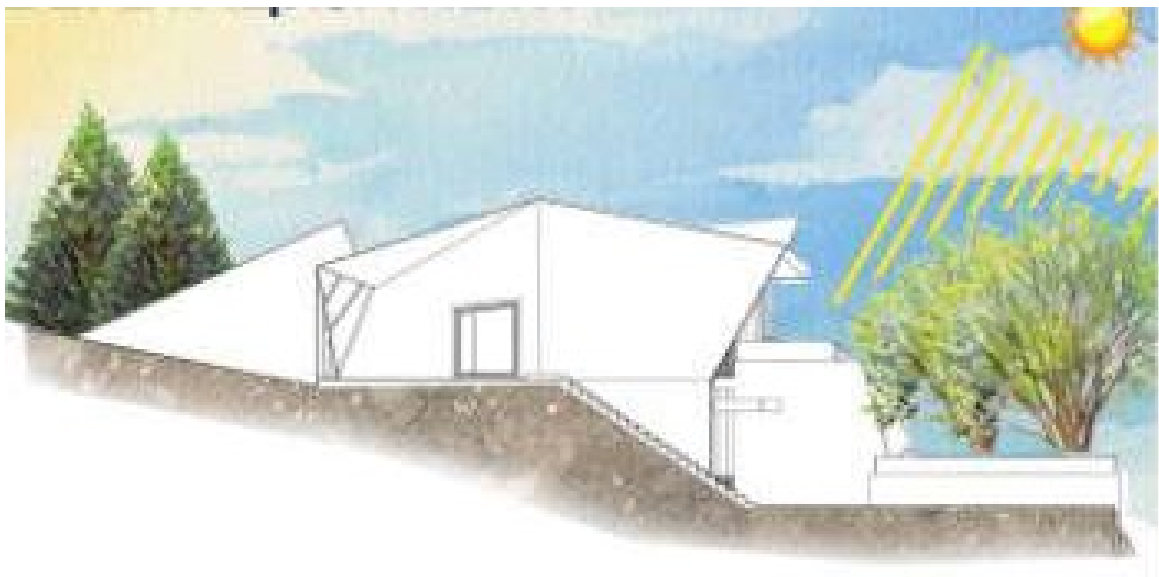


Slika 2.8. Prikaz severne strane objekta koja je u potpunosti ukopana u teren i delimično pokrivena zelenim krovom, kuća na brdu Vinik, u blizini grada Niša, RSrbija [29]

Zaključujemo da planiranje može uticati na izloženost vetru, tako da se omogući prirodno provetravanje u letnjem periodu, a spreče toplotni gubici u ostalim periodima godine, a ukoliko prirodna konfiguracija terena ne omogućava zaštitu od dominantnih vetrova, moguće je primeniti različite urbanističke mere.

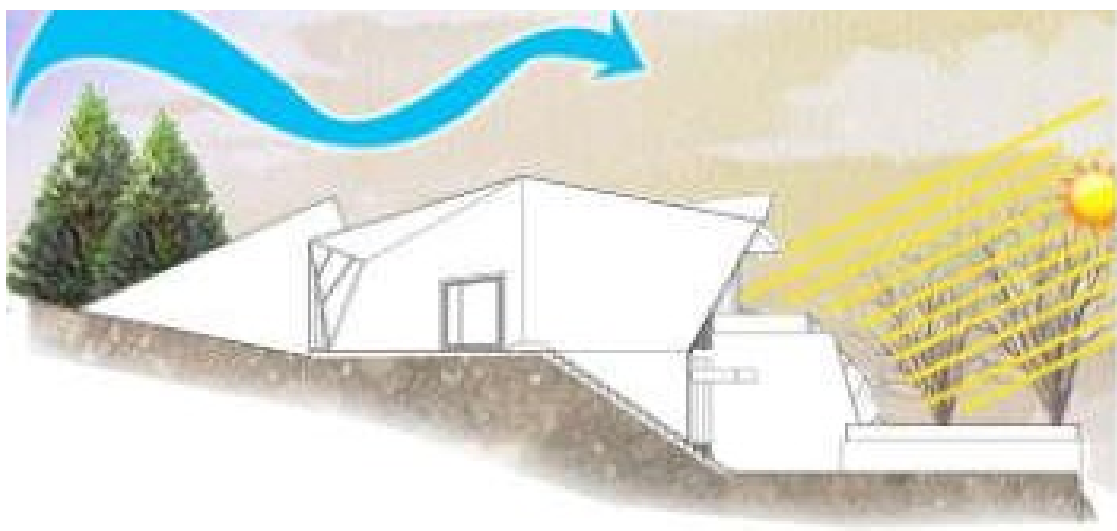
2.6.5. Vegetacija

Postojeća i planirana vegetacija na lokaciji veoma je značajna za uštedu energije, jer obezbeđuje prirodnu zaštitu od sunčevog zračenja i pozitivno utiče na urbanu ventilaciju. Pravilno raspoređeno drveće ima najveći ekološki i energetski uticaj od svih elemenata vegetacije, jer snižava temperaturu u toku leta, dok zimi ublažava niske temperature i sprečava zamrzavanje apsorbovanjem sunčevog zračenja i sprečavanjem udara vetra [28]. Na šematskom prikazu na slikama 2.9 i 2.10, na primeru kuće na brdu Vinik, prikazan je poželjan raspored zimzelene i listopadne vegetacije oko objekta [29].



Slika 2.9. Prikaz zaštite objekta od preteranog osunčanja u letnjem periodu putem listopadne vegetacije, kuća na brdu Vinik, u blizini grada Niša, RSrbija [29]

Vegetacija je raspoređena tako da u letnjem periodu listopadno drveće na južnoj strani lokacije štiti objekat i staklenu baštu od pregrejavanja, dok u zimskom periodu, kada lišće opadne, sunčevi zraci slobodno mogu dopreti do objekta.



Slika 2.10. Prikaz zaštite objekta od vetra zimzelenom vegetacijom tokom zime i osunčanja južnih prostorija, kuća na brdu Vinik, u blizini grada Niša, RSrbija [29]

Zimzeleno drveće je raspoređeno na severnoj strani lokacije tako da u periodu grejne sezone štiti objekat od dejstva severnih vetrova i time smanjuje toplotne gubitke objekta i negativne uticaje vetra na objekat [29].

Zelene površine su važne i zbog sprečavanja efekta „toplotnog ostrva”. Prirodni pokrivač smanjuje refleksiju i omogućava oticanje površinskih voda i veći stepen isparavanja, dok drveće zadržava vlagu i obezbeđuje zasenčenje fasada objekata, trotoara, popločanih površina, parking prostora i igrališta, čime se smanjuje temperatura u stambenom kompleksu. S druge strane, zasenčenjem fasada može se smanjiti učinak rada ugrađenih solarnih sistema. Gde god je moguće, važno je očuvanje postojećeg drveća, žbunja i površinskih slojeva tla, a zbog prilagođavanja lokalnoj klimi i zemljištu preporučuje se korišćenje autohtonih biljnih vrsta [28].

Na osnovu analiziranog može se zaključiti da postojeća i planirana vegetacija na lokaciji je od velikog značaja za uštedu energije, obezbeđuje prirodnu zaštitu od sunčevog zračenja i pozitivno utiče na urbanu ventilaciju. Zelene površine sprečavaju efekat „toplog ostrva“, smanjuju refleksiju, odводе površinske vode. Drveće zadržava vlagu, svojom senkom smanjuje temperaturu u stambenom kompleksu, ali nije dobro za fasade jer smanjuje efikasnost ugrađenih solarnih sistema.

Takođe možemo zaključiti sledeće. Da bi se zgrada ponašala kao energetski efikasan objekat sa sistemom prijema sunčeve energije koji će pružati maksimalne efekte, takav objekat mora uzeti u obzir prirodne faktore okruženja. Na osnovu analiziranih parametara, i paralelno analiziranog objekta (studija slučaja-kuća na brdu Vinik, kod grada Niša u Republici Srbiji), mogu se dobrim planiranjem izbeći negativne karakteristike lokacije, koje bi mogle uticati na smanjivanje funkcionalnih, zdravih, bezbednih, ekonomičnih efekata, ali isto tako i na smanjivanje oblikovanog i estetskog značaja. Međutim, kako u većini slučajeva su u pitanju već izgrađeni objekti koji ne ispunjavaju bioklimatske uslove celovito, a na koje su naknadno postavljeni solarni paneli, postavlja se pitanje ponašanja solarnih panela (ćelija) kao izvora dopunske ili kompletne električne energije. U tom smislu će se ispitivati snaga solarnih panela u realnim uslovima i analizirati dobijene karakteristike, kao i njihove promene sa vremenom. Na osnovu fizičkih parametara i solarnih fotonaponskih tehnologija analiziraće se karakteristike solarnih ćelija, potrebnih za ispitivanje snaga solarnih panela u realnim uslovima.

POGLAVLJE 3

STRUKTURA POLUPROVODNIČKIH SOLARNIH KOMPONENATA ZA FOTONAPONSKU (FN) KONVERZIJU

3.1. Uvod

Da bi se moglo razmatrati napajanje nisko-energetskih kuća električnom energijom iz fotonaponskih (solarnih) ćelija, potrebno je razmotriti osnove principe rada solarnih ćelija i načina njihove karakterizacije. To je neophodno da bi se mogla pratiti ispitivanja primenljivosti solarnih ćelija u predviđenom cilju.

U ovom poglavlju date su detaljne karakteristike solarnih ćelija za primenu solarnih panela u materijalizaciji nisko-energetskih objekata, sve u cilju odabira kvalitetnih karakteristika i postizanja veće energetske efikasnosti i komfora stanovanja.

Solarna energija je energija sunčevog zračenja koju primećujemo u obliku svetla i toplote, koju primamo od najvećeg izvora energije na zemlji, Sunca. Osim neposrednog zračenja koje greje zemljinu površinu i stvara klimatske uslove, ovo zračenje je odgovorno za stalno obnavljanje energije vetra, morskih struja, talasa, itd. Upotreba solarne energije ima višestruke prednosti. To je tih, čist i pouzdan izvor energije. Ova energija se može koristiti na razne načine i upotrebiti kao toplotna, električna, hemijska i mehanička. Solarna ćelija je poluprovodnički uređaj koji pretvara energiju svetlosti direktno u električnu energiju pomoću fotonaponskog efekta. Ovo je fizički proces tokom koga solarna ćelija konvertuje sunčevu svetlost u električnu energiju.

Zaključujemo, da bi se moglo razmatrati napajanje nisko-energetskih kuća električnom energijom fotonaponskih solarnih ćelija, potrebno je razmotriti osnove principe rada i karakteristike solarne ćelije kao poluprovodničkog uređaja. O ovome više reći u narednom podpoglavlju.

3.2. Karakteristike poluprovodničkih materijala

Provodnici i neprovodnici se sastoje od elektroprovodnih i elektroneprovodnih materijala. Dok prvi materijali provode električno naelektrisanje, ovi drugi ne provode naelektrisanje odnosno razdvajaju različite potencijale [30,31,32,33].

Neprovodni materijali mogu biti dielektrični i poluprovodni. Ova podela se vrši po kriterijumima baziranim na osnovnim karakteristikama materijala odnosno energetskom procepu. Međuatomska dejstva na kvantnomehaničkom nivou ima kao posledicu stvaranje energetskog procepa. Drugim rečima, konstitutivni atomi se kolektiviziraju i gube svoju kvantnomehaničku autonomiju tako što nastaju kristali kao deo kvantno-mehaničkog sistema.

Ovakvo kolektiviziranje atoma doprinosi pojavi energetske zone i pojavi periodičnog električnog polja unutar kristala. Energetske zone, iliti zonalne strukture, zavise od cepanja kvantnih nivoa pojedinačnih atoma u spomenutom kristalu. Tako se na osnovu vrednosti energetskog procepa bazira savremena podela električnih materijala. Postoji nekoliko kriterijuma podele električnih materijala [32,33].

Provodni materijali se sastoje od nepopunjenih energetske zone. Oni se nalaze iznad valentne zone. Pod dejstvom spoljašnjeg električnog polja, elektroni se lako premeštaju na susedne nivoe koji su viši i na taj način stvaraju električnu struju. Kod neprovodnih materijala, valentna zona je sasvim popunjena. Rezultat toga je da spoljašnje električno polje ne predaje elektronima dovoljno energije i oni ne mogu da ostvare međuzonske prelaze. Na ovaj način spomenuti materijali postaju neprovodni pri uobičajenim vrednostima spoljašnjeg električnog polja. Na bazi energetskog procepa poluprovodni materijali imaju energetski procep manji od 3,5 eV, a dielektrični materijali veći od 3,5 eV [34,35,36].

Podela električnih materijala se može izvršiti i na osnovu ponašanja u spoljašnjem električnom polju. Tako se ova podela zasniva na vrednostima specifičnih električnih otpornosti. Činjenica je da možemo lako da odredimo specifičnu električnu otpornost za neprovodne i provodne materijale. Na osnovu vrednosti specifične električne otpornosti, električni materijali se dele na:

- provodne materijale čija je vrednost specifične električne otpornosti između $10^{-6} \Omega m$ i $10^{-8} \Omega m$,
- poluprovodne materijale čija je vrednost specifične električne otpornosti između $10^{-6} \Omega m$ i $10^{10} \Omega m$, i
- dielektrične materijale čija je vrednost specifične električne otpornosti između $10^6 \Omega m$ i $10^{18} \Omega m$ [37].

Kriterijum prema veličini energetskog procesa je pouzdaniji jer ne dolazi do preklapanja vrednosti specifične električne otpornosti karakteristične za poluprovodne materijale i dielektrične materijale. Razlika u mehanizmu provođenja električne struje između provodnika i poluprovodnika je suštinske prirode. Jer, dok provodnici električnu struju provode usmerenim kretanjem slobodnog naelektrisanja, poluprovodnici je provode usmerenim kretanjem i *slobodnog* i *vezanog naelektrisanja*. Mogućnost usmerenog kretanja vezanog naelektrisanja posledica je talasne prirode elektrona u kristalu i atomu kao kvantnomehaničkim sistemima, to jest predstavlja kvantnomehanički efekat. Da bi se izbegao komplikovani kvantnomehanički aparat, uobičajeno je da se tretman usmerenog kretanja vezanog naelektrisanja u poluprovodnim materijalima tretira kao usmereno kretanje fiktivnog pozitivnog naelektrisanja nazvanog *šupljina*. Šupljina, kao, što to imenom asocira, predstavlja upražnjeno elektronsko mesto u kristalnoj rešetki, i javlja se kada nekom strukturnom atomu nedostaje jedan elektron.

U idealno čistom poluprovodniku šupljine se generišu jonizacijom atoma kristalne rešetke, prouzrokovane toplotom ili nekim drugim oblikom dovedene energije. Prema tome, na temperaturi apsolutne nule, čist poluprovodnik ima potpuno popunjenu valentnu zonu i potpuno praznu provodnu zonu. Povećanjem temperature ili dovođenjem energije na neki drugi način, energetski spektar mu se menja tako da se u provodnoj zoni javljaju slobodni elektroni, a u valentnoj zoni prazna mesta, šupljine, nastale njihovim prelaskom u provodnu

zonu [38,39].

Energija tako nastalih elektrona i šupljina, utoliko je veća ukoliko su udaljeniji od dna provodna zone, odnosno od vrha valentne zone. To znači da ako šupljina prelazi sa višeg na niži energetske nivo, elektron prelazi sa nižeg na viši. Posledica opisanog mehanizma generisanja slobodnih elektrona i šupljina u čistom poluprovodnom materijalu je da se oni javljaju istovremeno, energetski upareni. Na taj način formirana jednaka koncentracija slobodnih elektrona i šupljina naziva se *sopstvena koncentracija*, kao i odgovarajuća specifična električna provodnost. Tehnološkim postupkom nazvanim *dopiranje* moguće je dobiti poluprovodnike kod kojih koncentracije slobodnih elektrona i šupljina nisu jednake, odnosno kod kojih je provodnost pretežno elektronske ili šupljinske prirode. Postupak dopiranja se sastoji u dodavanju stranih atoma, takozvanih primesa, osnovnom poluprovodnom materijalu. Tako dobijeni - poluprovodnici se stoga nazivaju *primesni*.

Elektroni primesnih atoma, po pravilu, imaju različite karakteristične energije od odgovarajućih energija atoma osnovnog poluprovodnika. Pošto atoma primesa ima znatno manje nego osnovnih atoma, to oni ne reaguju međusobno, te će u energetskom spektru poluprovodnika svi biti na istom, takozvanom primesnom nivou. Prema položaju primesnog nivoa u odnosu na energetske spektar osnovnog materijala primese delimo na *donore* i *akceptore* [40,41].

Na temperaturama iznad apsolutne nule, usled termičkog pobuđivanja generišu se slobodni elektroni i šupljine. Krećući se kroz kristalnu rešetku oni se, nakon nekog vremena, susreću, i pri tom se rekombinuju. Da nema rekombinacije, broj slobodnih elektrona i šupljine bi neprekidno rastao. Ovako, na svakoj temperaturi postoji ravnoteža između procesa generacije i procesa rekombinacije nosilaca naelektrisanja. Prema tom modelu, oslobođeni elektroni i šupljine su jedno vreme slobodni, nakon čega se rekombinuju, pri čemu se, statistički posmatrano, neki drugi par generiše. To znači da slobodni elektron, odnosno slobodna šupljina, postoje (žive) konačno, statistički određeno, dok se *vreme života elektrona* naziva *vreme života šupljine*. Vreme života elektrona i šupljine je, obično, mnogo veće od odgovarajućeg vremena relaksacije, tako da oni u toku svog postojanja izvrše veliki broj sudara sa atomima kristalne rešetke (do 10^3 sudara). Za funkcionisanje poluprovodnih naprava, vreme života nosilaca igra bitnu ulogu. Pri izboru materijala za njihovu izradu, treba između ostalog, zavisno od namene, voditi računa da li se uzima materijal sa direktnim ili indirektnim energetskim procepom, pošto prvom odgovara kraće vreme života nosilaca naelektrisanja [40,41].

Veoma rasprostranjena primena poluprovodnih materijala najviše duguje osobinama p-n spoja, koji igra osnovnu ulogu kod skoro svih poluprovodnih naprava. Spoj p-n predstavlja prelaznu oblast između dva dela istog poluprovodnika od kojih jedan ima akceptorske primese, to jest p tipa, a drugi ima donorske primese, odnosno n tipa. Sam proboj p-n spoja nastaje kao posledica jakog električnog polja u prelaznoj oblasti, a može se odvijati jednim od dva poznata mehanizma ili njihovom kombinacijom. Ti probojni mehanizmi su Zenerov mehanizam i lavinski mehanizam [42,43,44].

Zenerov mehanizam proboja p-n spoja nastupa kada se povećanjem napona inverzne polarizacije energetske nivoi u prelaznoj oblasti pomere toliko da valentna zona p oblasti dođe naspram provodne zone n oblasti, a prelazna oblast dovoljno suzi. U tome slučaju se

ostvaruju uslovi za prelaz *tunel efektom* elektrona iz p oblasti u n oblast. Tunel efekat je kvantnomehanički efekat pri prolazu čestica kroz potencijalnu barijeru višu od njihovih energetskih nivoa. Ovaj efekat je moguć zahvaljujući talasnoj prirodi čestica. Uslov za odigravanje tunel efekta je postojanje upražnjenih mesta sa strane potencijalne barijere na koju penetrira čestica. Verovatnoća tunel efekta je utoliko veća ukoliko je potencijalna barijera uža i niža. Makroskopski se to manifestuje naglim porastom inverzne struje pri naponima koji su označeni kao probojni napon. Vrednost probojnog napona Zenerovim mehanizmom proboja opada sa porastom temperature, pošto se pri višim temperaturama lakše oslobađaju elektroni pre tunelovanja. Zenerov mehanizam proboja se javlja u slučaju jako dopiranih p-n spojeva, odnosno u slučaju male specifične otpornosti osnovnog poluprovodnog materijala [45,46].

Lavinski mehanizam proboja p-n spoja nastupa kada se povećanjem napona inverzne polarizacije stvore uslovi da prilikom prelaska elektrona iz p oblasti u n oblast dođe do njihove multiplikacije. Elektronska multiplikacija nastupa kada elektron na srednjoj slobodnoj dužini puta između dva sudara sa atomima kristalne rešetke preuzme od elektronskog polja dovoljno energije da izvrši sudarnu jonizaciju. Na taj način dolazi do lavinskog procesa sličnog procesu električnog proboja gasova. Makroskopski se taj proces manifestuje naglim porastom inverzne struje pri dostizanju probojnog napona. Vrednost probojnog napona lavinskim mehanizmom raste sa porastom temperature, jer je pri višim temperaturama dužina srednjeg slobodnog puta elektrona kraća. Lavinski probojni mehanizam se javlja u slučaju slabo dopiranih p-n spojeva, odnosno spojeva veće specifične otpornosti osnovnog poluprovodnog materijala.

Na osnovu ovog razmatranja može se zaključiti da je p-n spoj usmerački. To je zbog toga što kroz njega u jednom smeru protiče velika struja pri malim naponima, a u drugom mala struja čak i pri velikim naponima. Takav spoj sa izvodima iz p i n oblasti, koji mu omogućavaju uključivanje u električno kolo, naziva se *poluprovodnička dioda*.

Postoje različiti kriterijumi za podelu poluprovodnih materijala. Njih je moguće podeliti prema kristalnoj strukturi, tipu energetskog procepa, širini energetskog procepa, zastupljenim hemijskim vezama, primeni itd. Elementarni poluprovodni materijali su bor, ugljenik, silicijum, germanijum, kalaj, fosfor, arsen, antimon, sumpor, selen, telur i jod. Na osnovu dvokomponentnih poluprovodnih legura razvio se inženjering energetskog procepa. Inženjering energetskog procepa nam omogućava da kontrolisanim tehnološkim procesom dobijamo poluprovodnike željenih karakteristika. Pored mogućnosti inženjeringa energetskog procepa izradom trokomponentnih jedinjenja, u novije vreme se sve više primenjuje inženjering energetskog procepa izradom nanostrukture, kao što su superrešetke, kvantne žice i kvantne tačke. Poluprovodnički materijali dobijeni na taj način imaju primenu uglavnom u mikroelektronici i optoelektronici.

Najvažnije oblasti primene poluprovodnih materijala u elektrotehnici, arhitekturi, građevini i mašinstvu su za izradu integrisanih kola, solarnih ćelija, detektora zračenja i izvora svetlosnog zračenja. Izbor poluprovodnika od kojih se izrađuju pojedine od ovih komponenata zavisi od uslova njihovog funkcionisanja, a vrši se na osnovu širine energetskog procepa, tipa energetskih procepa, transportnih i termičkih karakteristika.

Na osnovu analiziranih poluprovodničkih karakteristika, može se zaključiti. Poluprovodnici spadaju u grupu neprovodnih materijala, na osnovu energetskog procepa.

Odnosno, materijali čija se vrednost specifične električne provodnosti nalazi između izolatora i provodnika nazivaju se poluprovodnici. Poluprovodnici mogu biti hemijski elementi (silicijum, germanijum, kalaj, fosfor, arsen, antimon...) ili jedinjenja. Za sve poluprovodnike karakteristično je da im se specifična električna provodnost može povećati primenom tehnoloških postupaka kojima se modifikuje njihov hemijski sastav. Veoma rasprostranjena primena poluprovodnih materijala najviše duguje osobinama p-n spoja, koji igra osnovnu ulogu kod skoro svih poluprovodnih naprava. Na osnovu izrečenih osnovnih karakteristika poluprovodničkih materijala koji se koriste za izradu solarnih ćelija, mogu se objasniti principi rada i izlazne karakteristike fotonaponske solarne ćelije.

3.3. Principi rada i osnovne izlazne karakteristike fotonaponske solarne ćelije

U ovom delu se upoznajemo sa osnovnim karakteristikama poluprovodničkih materijala za izradu solarnih ćelija, osnovnim principima rada i izlaznim karakteristikama solarnih ćelija, koje omogućavaju njihov maksimalan i efikasan rad.

3.3.1. Istorija fotonaponske konverzije

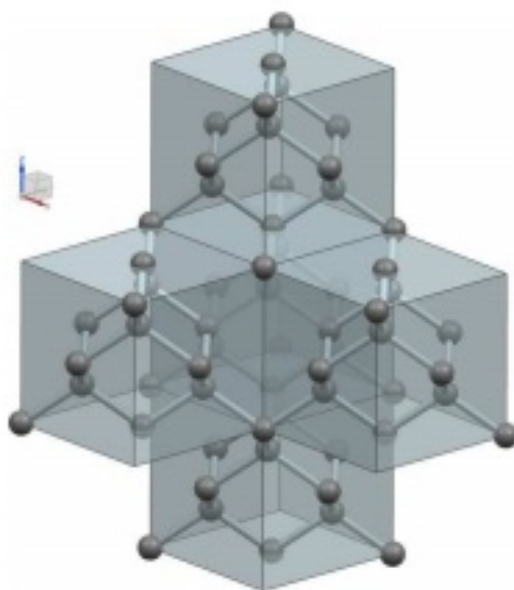
Godine 1839, Bekerel je primetio da se jačina struje između dve elektrode u elektrolitu povećava prilikom njihovog osvetljavanja i u tom trenutku se može reći da počinje razvoj solarnih ćelija. W. G. Adams i R. E. Day su to isto primetili 1877. godine. Na osnovu ovoga je napravljen i uređaj za merenje intenziteta svetlosti. Od tog trenutka je krenulo da se radi na tome da se pronađe rešenje kako bi se obezbedilo korišćenje solarnih ćelija u komercijalne svrhe. U vremenskom periodu kada su Pearson, Fuller i Chapin napravili prvu solarnu ćeliju od monokristalnog silicijuma otpočeo je nagli razvoj solarnih ćelija (1954).

Solarne ćelije predstavljaju nezamenljiv izvor električne energije na satelitima, svemirskim brodovima i stanicama naročito od trenutka lansiranja prvog satelita 1958. Godine. Kada je u pitanju planeta zemlja, solarne ćelije su našle primenu na mnogim vrstama objekata kao što su svetionici, aerodromi, istraživačke platforme na moru, stambeni i industrijski objekti i ostalo. Materijali koji se najčešće koriste u izradi solarnih ćelija su od raznovrsnih hemijskih elemenata: silicijuma, germanijuma, telura, bakra, kadmijuma, itd. Za proizvodnju poluprovodničkih komponenata se iz ekonomskih i tehnoloških razloga najviše koristi silicijum (Si) s toga će se u daljem razmatranju objasniti princip rada silicijumske solarne ćelije [47,48].

3.3.2. Princip rada silicijumske solarne ćelije

Silicijum je, posle gvožđa, drugi element po rasprostranjenosti u Zemljinoj kori i učestvuje u sastavu većine stena koje čine njenu površinu. Svaki atom silicijuma povezan je sa četiri susedna atoma. Ovakav raspored atoma omogućava konstrukciju zamišljene kocke koja čini jediničnu ćeliju kristalne rešetke silicijuma. Stranica kocke se naziva konstanta

rešetke. Translacijom jedinične ćelije za konstantu rešetke duž prostornih osa (x, y i z) dobija se kristalna rešetka silicijuma (slika 3.1) [49,50].



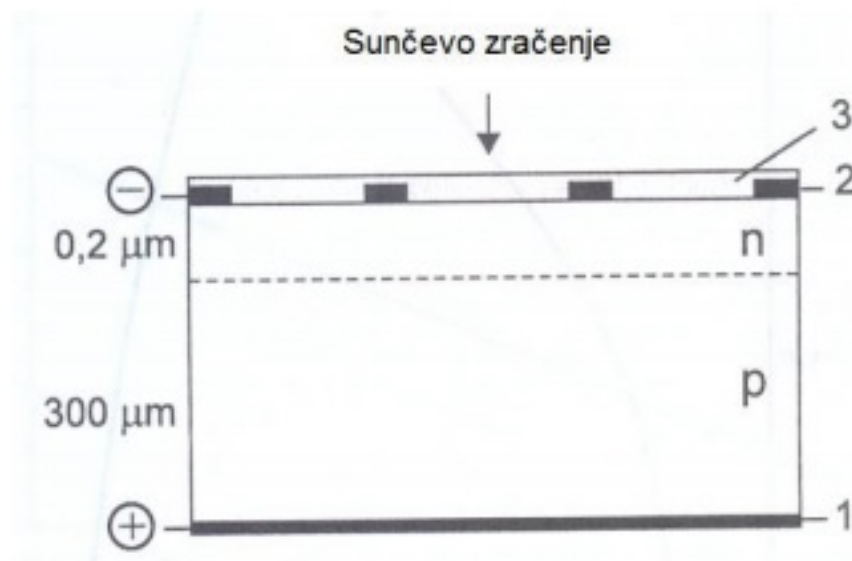
Slika 3.1. Kristalna struktura silicijuma [50].

U zavisnosti od uniformnosti kristalne rešetke, mogu se razlikovati tri tipa silicijuma [50]:

1. monokristalni — kristalna rešetka je uniformna na makroskopskom nivou;
2. polikristalni — kristalna rešetka je uniformna na mikroskopskom nivou;
3. amorfni — kristalna rešetka nije uniformna. Sva tri tipa silicijuma se koriste u proizvodnji poluprovodničkih komponenata.

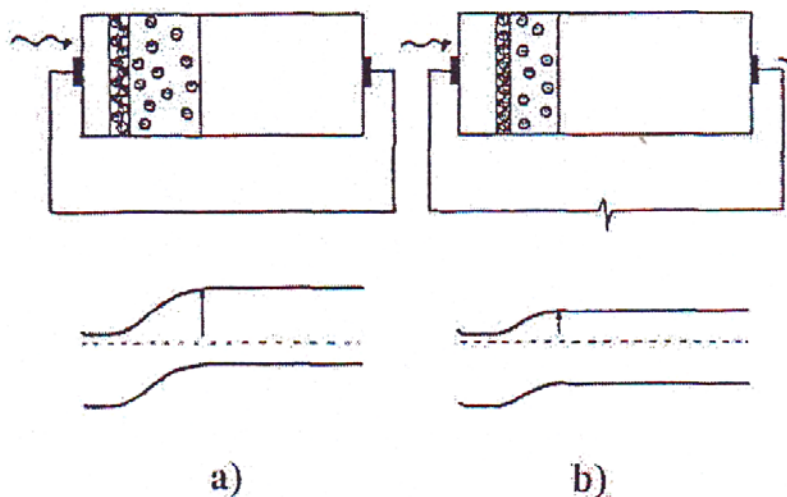
Na dalje će se razmatranja odnositi samo na monokristalni silicijum.

Pomoću fotonaponskog efekta može se sunčeva energija direktno pretvoriti u električnu u solarnim ćelijama. Kada solarna ćelija apsorbuje Sunčevo zračenje, fotonaponskim efektom se na njenim krajevima proizvede elektromotorna sila i tako solarna ćelija postaje izvor električne struje. Silicijumska p-n solarna ćelija (slika 3.2) je zapravo dioda u kojoj se upadni fotoni apsorbuju i generišu parove elektron-šupljina (ili eksitone u drugim konfiguracijama). Negativni elektroni i pozitivne šupljine moraju se razdvojiti da bi parovi elektron-šupljina mogli preko strujnog kola predati svoju energiju potrošaču u spoljašnjem kolu [51,52].



Slika 3.2. Šema monokristalne silicijumske solarne ćelije: 1) anoda (hladna elektroda), 2) katoda (usijana elektroda), 3) sloj za smanjenje refleksije svetlosti [52].

Razdvajanje se postiže unutrašnjim električnim poljem p-n spoja, koje se formira stvaranjem prostornog naelektrisanja diode. Kod stvaranja struje solarne ćelije, bitni su samo oni parovi elektron-šupljina koju su formirani u oblasti prostornog tovara (naelektrisanja), i kojima je vreme života dovoljno dugo da mogu difundirati do p-n spoja. Nosioci naelektrisanja formirani izvan ovih oblasti će biti rekombinovani kao manjinski nosioci naelektrisanja. Elektroni kreirani na p-strani i šupljine kreirane na n-strani (manjinski nosioci), biće privučeni tim poljem i kretaće se ka n, odnosno p delu diode, pritom slabeći barijeru. Napon uspostavljen između spoljašnjih kontakata diode omogućuje protok struje kroz spoljašnje kolo ukoliko su krajevi solarne ćelije vezani za neki potrošač. Održavanju tog napona pridonosi novo generisanje nosilaca naelektrisanja u spoju, koji difunduju ka p-n prelazu [53,54,55].



Slika 3.3. Uprošćena šema osvetljene n^+p solarne ćelije i dijagrami energetske zona:
a) u kratkom spoju i b) sa potrošačem [55]

Na slici 3.3. data je uprošćena šema $p-n$ homospojne solarne ćelije, kao i dijagrami energetske zona osvetljene $p-n$ homospojne solarne ćelije (valentne i provodne zone i Fermijevog nivoa) [55]. Razmatrana struktura je n^+p , koja je u praksi najčešći slučaj homospojne silicijumske solarne ćelije. Prikazana su dva slučaja: kratko spojeni krajevi (slika 3.3.a), i sa priključenim potrošačem između krajeva solarne ćelije (slika 3.3.b). Formiranjem n^+p spoja, usled ogromne razlike u koncentracijama većinskih nosilaca naelektrisanja u n^+ i p delu, javljaju se jake difuzione težnje za kretanjem elektrona iz n^+ dela u p deo, i šupljina u suprotnom smeru. Posledica ovih kretanja je da uz sam spoj ostaju nekompenzovani (negativni) akceptorski joni u p - delu. Ta struktura formira električno polje, koje je usmereno tako da sprečava dalje difuziono kretanje većinskih nosilaca iz n^+ u p - deo, i obratno. Nekompenzovani joni stvaraju dipole smeštene u jednu usku oblast uz sam spoj. Ta oblast se naziva oblast prostornog tovara i pretpostavka je da u njoj nema slobodnih nosilaca naelektrisanja, a van nje (u tzv. neutralnim oblastima) nema nekompenzovanih jona. Primećeno je, da se oblast prostornog tovara manje prostire u oblast poluprovodnika koji je jače dopiran i to u toliko manje što je nivo dopiranja viši. Kontaktne razlike potencijala je razlika potencijala između graničnih površina oblasti prostornog tovara i zavisi (kao i vrednost ugrađenog električnog polja) od broja dipola u oblasti prostornog tovara. Usled dejstva ovog polja svi manjinski nosioci koji uspeju da stignu do granica prostornog tovara bivaju prebačeni u suprotan deo spoja. Kad ne postoji spoljašnja pobuda (najčešće spoljašnji incidentni svetlosni talas), vrednost kontaktne razlike potencijala, omogućuje da ukupna struja kroz spoj, koju čine struje većinskih i manjinskih nosilaca, bude jednaka nuli. Vrednost kontaktne razlike potencijala za silicijum iznosi oko 0,6V, ili polovinu vrednosti energetskog procepa [56,57,58,59].

Kada osvetlimo solarnu ćeliju, javljaju se sledeći procesi. Ako upadni fotoni imaju energiju veću od vrednosti energetskog procepa materijala, stvore se uslovi za apsorpciju šupljina. Zavisno od osobina materijala i energije fotona, apsorpcija fotona se može odigrati u n^+ - delu, oblasti prostornog tovara ili p - delu. Stvoreni višak manjinskih nosilaca (šupljina u

n^+ - delu i elektrona u p - delu) difuzijom stiže do granica oblasti prostornog tovara, pre nego što se nosioci rekombinuju a jako uređeno polje u oblasti prostornog tovara prebacuje manjinske nosioce u suprotan deo. Tada dolazi do protoka fotogenerisane struje, pojave napona na krajevima ćelije i obezbeđenja električne snage za potrošača. Iako je polaritet napona na krajevima ćelije identičan direktnoj polarizaciji obične spojne diode, smer fotogenerisane struje je suprotan od smera struje spojne diode pri direktnoj polarizaciji. Ta struja se u slučaju solarnih ćelija naziva struja mraka i čini degradirajući faktor. Pad napona na potrošaču, stvoren protokom svetlosno generisane struje, ima isti efekat kao priključenje baterije na napon direktne polarizacije vrednosti $R-I$ [60,61]..

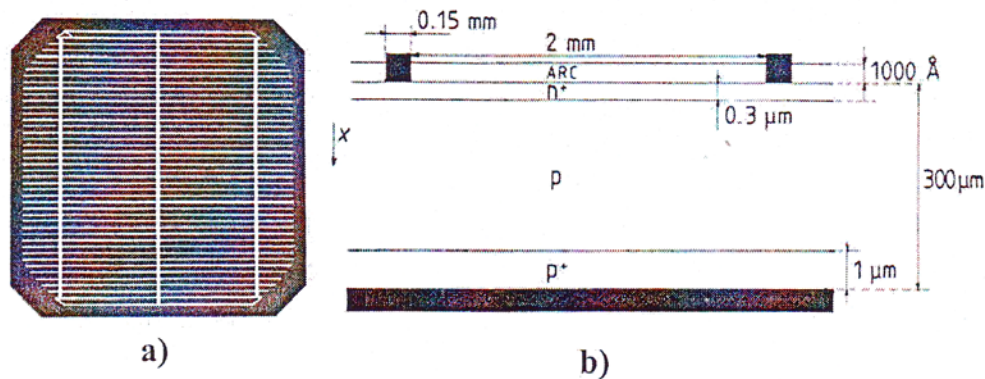
Interakcijom upadne svetlosti sa solarnom ćelijom, dešavaju se sledeći fizički procesi:

- Refleksija (gubitak) određenog dela energije od površine ćelije.
- Korisna apsorpcija rezultuje kreiranjem parova elektron-šupljina, dok parazitska apsorpcija utiče na zagrevanje (deo svetlosti se ne apsorbuje i prolazi neiskorišćen kroz ćeliju).
- Razdvajanje i kolekcija fotogenerisanih nosilaca naelektrisanja
- Kretanje nosilaca naelektrisanja prema spoljašnjim kontaktima.
- Disipacija fotogenerisane struje na spljašnjem potrošaču.

Osnovni zahtev za dobijanje efikasnih solarnih ćelija mogu se sumirati u sledećem [62,63]:

- Apsorpcija sunčeve svetlosti i kreiranje parova elektron-šupljina moraju biti odgovarajući.
- Generisani parovi elektron-šupljina moraju se razdvojiti; elektroni se moraju koncentrisati u n-tipu, dok se šupljine moraju koncentrisati u poluprovodniku p-tipa.
- Gradivni potencijal mora biti dovoljno veliki jer određuje maksimum izlaznog napona ćelije. Omski pad napona, kao posledica parazitskih otpornosti, mora se svesti na najmanju moguću meru.
- Metalni (rešetkasti) pokrov mora biti mali. Debeli metalni slojevi nisu transparentni.

Na slici 3.4. prikazana je solarna ćelija na bazi monokristalnog silicijuma (slika 3.4.a) i njen uprošćeni šematski prikaz (slika 3.4.b) [64]. Solarne ćelije predstavljaju spojnu diodu velike površine, koja je prekrivena antirefleksionim slojem i izvedenim kontaktima sa obe strane. Prednja kontaktna elektroda ima prstenastu strukturu, da ne sprečava da što veći deo upadne svetlosti stigne do aktivne površine solarne ćelije (zauzima 5-10% aktivne površine). Zadnja elektroda se obično nanosi preko cele zadnje strane solarne ćelije. Antirefleksioni sloj (jednostruki ili dvostruki) služi da se spreče značajni gubici refleksije upadne svetlosti od površine solarne ćelije. Dodavanjem tankog p^+ - sloja na zadnju stranu baze p-tipa, formira se površinsko povratno polje (BSF- back scattering field). Postojanje ovog polja značajno popravlja karakteristične izlazne električne veličine solarne ćelije, pre svega izlazni napon, napon otvorene veze i struju kratkog spoja [65,66,67]..



Slika 3.4. Monokristalna (c-Si) solarna ćelija: a) tipičan izgled prednje kontaktne strukture, b) poprečni presek [64]

Na osnovu istraživanja došlo se do sledećeg zaključka. Silicijumska p-n solarna ćelija je zapravo dioda u kojoj se upadni fotoni apsorbiraju i generišu parove elektron-šupljina. Rad solarne ćelije odvija se u tri koraka: 1) fotoni iz sunčeve svetlosti udaraju u solarni panel i poluprovodnički materijal poput silicijuma ih apsorbiraju; 2) elektroni se potiskuju iz atoma i postaju slobodni, te mogu da slobodno teku materijalom, čime se formira struja; 3) polje solarnih ćelija pretvara energiju sunca u upotrebljivu količinu jednosmerne struje. U trenutku kada je solarna ćelija povezana za strujno kolo i pri tom dovoljno osvetli, poteći će struja I kroz spoljašnji potrošač. Uz to, dati su osnovni zahtevi za dobijanje efikasnih solarnih ćelija. Antirefleksioni sloj služi da se spreče značajni gubici refleksije upadne svetlosti od površine solarne ćelije. Dodavanjem tankog p^+ sloja na zadnju stranu baze p-tipa, formira se površinsko povratno polje (BSF- back scattering field), koje značajno popravlja karakteristične izlazne električne veličine solarne ćelije, pre svega izlazni napon, napon otvorene veze i struju kratkog spoja. Dalje govorimo o navedenim izlaznim karakteristikama solarne ćelije.

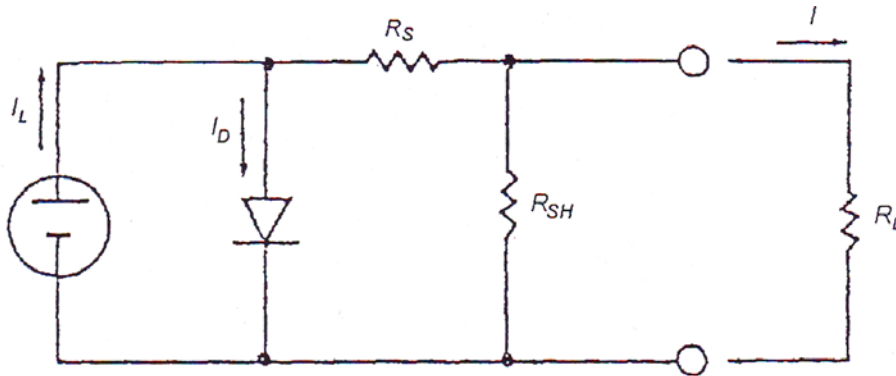
3.3.3. Zavisnost struje kratkog spoja i napona otvorenog kola solarne ćelije od osnovnih fizičkih parametara

U ovom delu rada biće reči samo o najvažnijim izlaznim karakteristikama solarnih ćelija: efikasnosti, faktoru ispune, naponu otvorenog kola, gustini struje kratkog spoja.

Analizom I-V karakteristika solarnih ćelija određuje se površinska gustina struje kratkog spoja J_{sc} i napona otvorenog kola V_{OC} . Vrednosti tih veličina se lako i direktno očitavaju sa I-V krive. Ove dve veličine predstavljaju dve krajnje tačke rada fotonaponskog uređaja koje su okarakterisane beskonačnom otpornošću potrošača kada je struja jednaka nuli (napon otvorenog kola V_{OC}), i nultom otpornošću kratkog spoja, kada je napon jednak nuli (gustina struje kratkog spoja J_{sc}). Na I-V karakteristici, J_{sc} i V_{OC} se određuju kao preseči krive sa ordinatom (J_{sc}) i apscisom (V_{OC}). Jednostavnim određivanjem ovih veličina a zbog njihove direktne zavisnosti od osnovnih parametara solarne ćelije (J_0 , R_s i faktora idealnosti),

struja kratkog spoja i napon otvorenog kola predstavljaju glavne izlazne karakteristike solarne ćelije. Njihovom analizom se dobija uvid u kvalitet celog uređaja [68,69,111,112].

Zbog analize i lakšeg shvatanja ovih pojmova, formiramo električno kolo ekvivalentno solarnoj ćeliji, koje se sastoji iz adekvatnog strujnog generatora, diode, paralelnog i rednog otpornika, kao i potrošača, slika 3.5. [68].



Slika 3.5. Ekvivalentno električno kolo koje odgovara realnoj solarnoj ćeliji [68]

Iz gore navedenog, zaključujemo. Najvažnije izlazne karakteristike solarnih ćelija su: efikasnost, faktor ispunje, napon otvorenog kola, gustin struje kratkog spoja. Njihovom analizom se dobija uvid u kvalitet celog uređaja.

3.3.3.1. Gustina struje kratkog spoja (J_{sc}) solarne ćelije

Gustina struje kratkog spoja je aproksimativno definisana fotogenerisanom strujom J_L , koja se metodom superpozicije dodaje struji mraka solarne ćelije, tj., $J_{sc} = -|J_L|$. Ovakvo linearno sabiranje struje mraka i fotogenerisane struje je pogodno i moguće kod idealnih (skoro idealnih) solarnih ćelija čija se I-V karakteristika može približno opisati jednačinom [69,112,113]:

$$J = J_0 \left[\exp \left\langle \frac{qV}{nkT} \right\rangle - 1 \right] - J_L \quad (3.1)$$

ili:

$$J = J_{sc} - J_0 \left[\exp \left\langle \frac{qV}{nkT} \right\rangle - 1 \right] \quad (3.2)$$

gde je:

J_0 – gustina struje zasićenja,

V – primenjeni napon,

n – faktor idealnosti,
 k – Boltzmanova konstanta,
 q – elementarno naelektrisanje i
 T – temperatura.

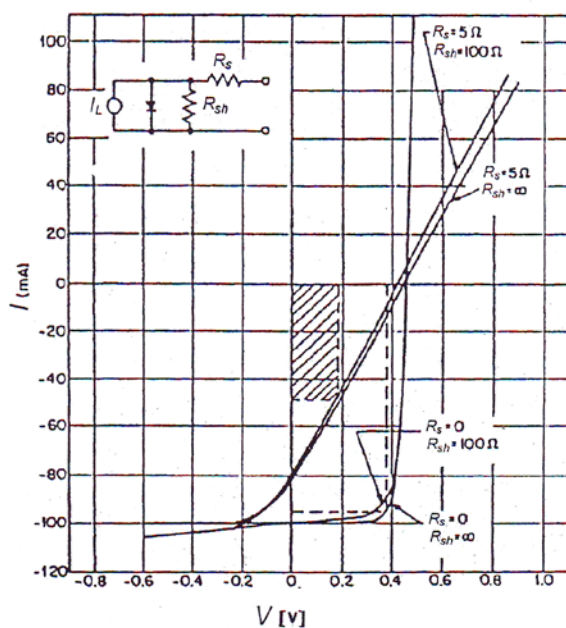
Prebačeno iz IV u I kvadrant I-V karakteristike, tj. u slučajevima relativno male redne i velike paralelne otpornosti. Međutim, u većini realnih slučajeva I-V karakteristika ima oblik dat jednačinom [69,70]:

$$J = J_{01} \left[\exp \frac{q(V-JR_S)}{kT} - 1 \right] + J_{0n} \left[\exp \frac{q(V-JR_S)}{nkT} - 1 \right] + \frac{(V-JR_S)}{kT} - J_L \quad (3.3)$$

gde je:

J_{01} J_{0n} – gustine struje zasićenja za $n = 1$ i $n > 1$, respektivno,

R_S R_{sh} – redna i paralelna otpornost, respektivno.



Slika 3.6. Teorijska I-V karakteristika solarnih ćelija sa uračunatom rednom R_S i paralelnom otpornošću R_{sh} [70]

Postojanje struje J na desnoj strani jednačine u slučaju kada je $R_S \neq 0$ i R_{sh} konačno, onemogućava direktnu superpoziciju fotogenerisane struje i struje mraka. U slučaju kada je paralelna otpornost R_{sh} izuzetno mala (postoji „curenje“ struje preko spoja) struja kratkog spoja je nešto manja od fotogenerisane struje J_L , tj [70,71,114,115].:

$$J_{sc} \approx \frac{J_L}{1 + \frac{R_S}{R_{Sh}}} \quad (3.4)$$

Kod većine solarnih ćelija paralelna otpornost ima veliku vrednost, te se aproksimacija $J_{sc} = -|J_L|$ smatra dovoljno tačnom (ne i pri većim intenzitetima osvetljenja kada R_s može unatno smanjiti J_{sc}). U prisustvu redne otpornosti, oblik I-V karakteristike se primetno menja (slika 3.6) [70,114,115].

Usled prisustva R_s u samoj ćeliji postoje gubici koji se na I-V karakteristici ispoljavaju kao povećanje zakrivljenosti „kolena“ krive (smanjenje „kvadratičnosti“). Tada se I-V karakteristika pri osvetljenju ne može dobiti direktnim prebacivanjem karakteristike u mraku na vrednost J_{sc} tj. metod superpozicije (prema jednačini 3.2.) ne važi.

Struja kratkog spoja je određena spektrom i intenzitetom svetlosnog izvora i spektralnim odzivom poluprovodničkog materijala solarne ćelije (brojem kolektovanih parova elektron-šupljina po upadnom fotonu), zato što je [69,70,116]:

$$J_L = q \int_0^\infty F(\lambda) SR(\lambda) d\lambda \quad (3.5)$$

gde je:

$F(\lambda)$ - broj upadnih fotona po jedinici površine u jedinici vremena u jediničnoj širini zone, a

$SR(\lambda)$ - spektralni odziv.

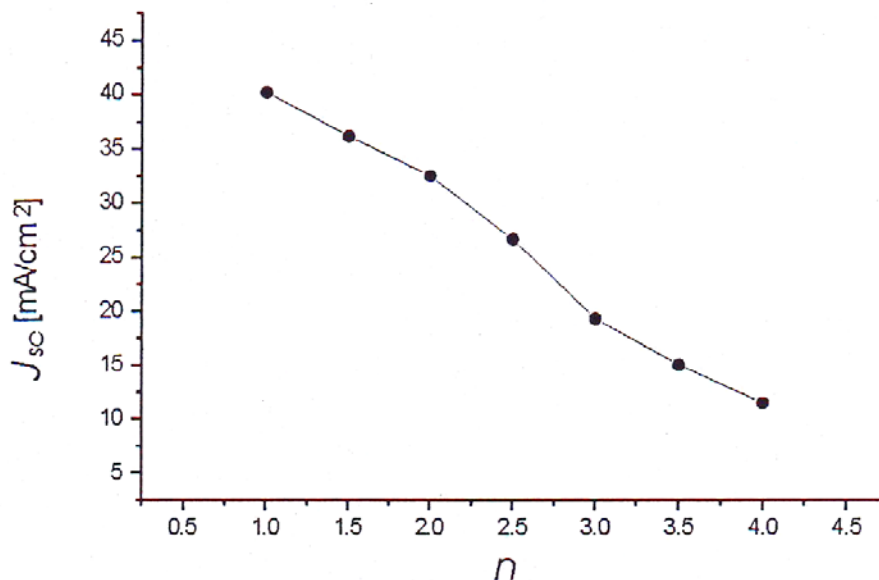
Spektralni odziv zavisi od koeficijenta apsorpcije α , dubine spoja, širine osiromašene oblasti (prostirnog tovara), vremena života i pokretljivosti (difuzione dužine) manjinskih nosilaca sa obe strane spoja, prisustva ili odsustva električnog polja na obe strane spoja i brzine površinske rekombinacije. Stopa fotogeneracije manjinskih nosilaca i njihova sposobnost da difunduju do spoja i izlaznih karakteristika u osnovi određuju vrednost gustine struje kratkog spoja [71,116].

Koeficijent apsorpcije α predstavlja sposobnost materijala da apsorbuje svetlost date talasne dužine i zavisi od vrste i veličine energetskog procepa materijala, kao i od gustine stanja u provodnoj i valentnoj zoni. Za materijale sa indirektnim energetskim procepom, kao što je silicijum, apsorpcija svetlosti i generacija nosilaca se dešavaju dosta duboko ispod silicijumske površine ($\approx 10\mu m$) i to usled veoma postepenog porasta koeficijenta apsorpcije sa energijom upadnog zračenja. Za energije upadnih fotona manje od 1,4eV, pri upadnom fluksu od 100 mW/cm², dobijene su vrednosti gustine struje kratkog spoja veće od 40 mA/cm² [71,116,117,118]. Takozvani optički gubici kod solarnih ćelija, tj. refleksija svetlosti od gornje površine ćelije i zasenčenje od gornje kontaktne mreže su prvi limitirajući faktori za vrednost struje kratkog spoja. Međutim odgovarajućim dizajnom i procesom proizvodnje, ovi činioici se mogu svesti na minimum. Kao prvo, to je teksturisane prednje površine solarne ćelije radi smanjenja refleksije i produženja optičkog puta svetlosti u ćeliji (čime se poboljšava generacija parova elektron-šupljina i tzv. crveni odliv ćelije – za manje vrednosti

upadne energije) i optimiziranje izgleda gornje kontaktne mreže radi zadovoljenja kontradiktornih uslova: manje zasenčenosti sa jedne strane i manje otpornosti kontakata sa druge. Novije tehnologije podrazumevaju nanošenje difuznih reflektujućih površina na zadnjoj strani ćelije, kako bi se uticalo na zadržavanje svetlosti unutar ćelije i smanjila transmisija svetlosti iz ćelije na graničnim površinama [69,70,72,118].

Sama kolekcija generisanih nosilaca je veoma često značajno smanjena rekombinacijom unutar materijala kao i na površini materijala, pa se uvođenjem dodatnog polja na zadnjoj strani ćelije (BSF) može povećati struja kratkog spoja. Visoka koncentracija nečistoća, defekata, pa i dopiranost materijala povećava broj mogućih rekombinacionih centara i verovatnoću rekombinacije stvorenih parova elektron-šupljina, što u krajnjem ishodu dovodi do smanjenja broja kolektovanih nosilaca naelektrisanja, tj. izlazne struje. Iz tog razloga je potrebno optimizirati dopiranost baze (10^{16} - 10^{17}cm^{-3}) [85,120], smanjiti što je više moguće dubinu spoja i povećati difuznu dužinu u bazi, što dovodi do povećanja struje kratkog spoja. Smanjenjem dubine spoja, povećava se efikasnost kolekcije ali i redna otpornost uređaja, pa se menjanjem koncentracije nečistoća p - sloja može stvoriti kompromis između željene debljine i redne otpornosti. Takođe, plići spojevi imaju bolji spektralni odziv u vidnom delu spektra, dok ćelije sa većom otpornošću imaju bolji odziv u infracrvenoj oblasti, pa se smanjenje dubine spoja smatra dobrim preduslovom za dobijanje većih struja kratkog spoja [69,70,72,119,121].

Uticaj spoljašnjih faktora kao što su temperatura i intenzitet osvetljenja na struju kratkog spoja mogu se posmatrati kroz njihov uticaj na stvaranje parova elektron-šupljina i njihov transport preko spoja. Iz jednačine (3.5) vidi se da je struja kratkog spoja direktno proporcionalna upadnom fokusu, tj. što je veći broj upadnih fotona, veći je i broj fotogenerisanih parova, pa je i struja veća. Svakako treba imati u vidu i spektralnu raspodelu upadnih fotona i njihovu prilagođenost energetsom procepu datog materijala, ali se uopšteno gledajući može reći da je gustina struje kratkog spoja direktno proporcionalna upadnom fluksu. Što se tiče temperaturske zavisnosti struje kratkog spoja, ona se ogleda u dva efekta: povećanje difuzione dužine u bazi i pomeranje apsorpcione ivice prema nižim energijama, što poboljšava spektralni odziv za veće talasne dužine, pa samim tim povećava i izlaznu struju. Povećanje difuzione dužine sa temperaturom usled povećanja difuzione konstante i vremena života nosilaca, povećava verovatnoću svakog nosioca da stigne do spoljašnjih kontakata bez rekombinacije. Međutim, povećanje gustine struje kratkog spoja sa povišenjem temperature je malo, pa se u globalnoj analizi može i zanemariti, naročito u poređenju sa promenama drugih fotonaponskih veličina sa temperaturom, kao što je npr. napon otvorenog kola [69,72,122,123].



Slika 3.7. Teorijska zavisnost gustine struje kratkog spoja od faktora idealnosti [73]

Eksperimentalno dobijena zavisnost gustine struje kratkog spoja od faktora idealnosti predstavlja odraz stanja unutar ćelije koje se zbog svoje složenosti i nedostatka podataka ne mogu teorijski obraditi na zadovoljavajući način (prostorna raspodela nečistoća i defekata unutar materijala, na samom spoju i na površini, njihovi energetski nivoi, zauzetost stanja, aktivaciona energija, verovatnoća rekombinacije i zavisnost svih ovih veličina od temperature ili napona, samo su neki od faktora koji se moraju uzeti u obzir prilikom analize transportnih procesa) [73,74]..

Teorijski izračunata zavisnost J_{sc} od faktora idealnosti (n) prikazana je na slici 3.7, [73].

Za njeno dobijanje je korišćena jednačina (3.2.) gde su opšte prihvaćene vrednosti sledećih veličina za silicijum: $V_{oc} = 0,6V$, $T = 300K$, upadni fluks $P_s = 100 \text{ mW/cm}^2$, dok su vrednosti za J_o birane tako da za $n = 1$ (faktor idealnosti) i $P_s = 100 \text{ mW/cm}^2$ gustina struje kratkog spoja bude 40 mA/cm^2 , a za $n > 1$ odgovarajuće proporcionalna. Opseg vrednosti faktora idealnosti je išao od $n = 1$ (idealni slučaj) do $n = 4$ sa korakom 0,5 [73,74,125,126].

Sa grafika se može videti da čak i kada se isključi većina drugih uticaja ($T = \text{const.}$, $P_s = \text{const.}$, nema direktnih gubitaka usled redne i paralelne otpornosti), povećanje faktora idealnosti (n) dovodi do izraženog smanjenja J_{sc} i to od 40 mA/cm^2 za $n = 1$, pa do samo $11,53 \text{ mA/cm}^2$, za $n = 4$. Ovakvo teorijsko razmatranje je nepotpuno zbog zanemarivanja kako pozitivnih tako i negativnih uticaja drugih faktora, ali može poslužiti za određivanje opšteg oblika zavisnosti [73,74,75,127,128].

3.3.3.2. Zavisnost napona otvorenog kola (V_{oc}) solarne ćelije

Zavisnost napona otvorenog kola od parametara ćelije se zasniva na izrazu koji definiše V_{oc} iz I-V karakteristike [76,128]:

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left[\frac{J_{sc}}{J_0} + 1 \right] \quad (3.6)$$

Dobijen je iz jednačine (3.2), u uslovima kada je izlazna struja jednaka nuli, tj. predpostavljajući da je otpornost potrošača beskonačno velika. Pošto je odnos J_{sc}/J_0 tipično reda veličine 10^{10} - 10^{14} , uvodi se aproksimacija [77,128]:

$$V_{oc} \approx \frac{nkT}{q} \ln \left[\frac{J_{sc}}{J_0} \right] \quad (3.7)$$

Na osnovu jednačina (3.6) i (3.7) može se zaključiti da V_{oc} prvenstveno zavisi od faktora idealnosti i J_0 , tj. parametara i procesa koji utiču na ove veličine. Površno gledajući moglo bi se zaključiti da bi povećanje faktora idealnosti i smanjenje J_0 dovelo do povećanja V_{oc} . Međutim, solarna ćelija je složen poluprovodnički uređaj sa jednom ili više jako dopiranih oblasti koje mogu da dovedu do pomeranja Fermijevog nivoa unutar provodne zone kada poluprovodnik postaje degenerisan, tj. elektronska raspodela podleže pre Fermijevoj nego Bolcmanovoj statistici i procesi unutar ćelije se ne mogu jednostrano posmatrati. Primećujemo da V_{oc} raste sa povećanjem koncentracije dopiranja ali samo do izvesne granice, nakon koje dolazi do smanjenja izlaznih karakteristika [77,128]. Usled složene zavisnosti V_{oc} od fundamentalnih parametara ćelije, zaključuje se da gustina struje zasićenja J_0 , treba da je što manja kako bi V_{oc} bilo veće. Definicija napona otvorenog kola kaže da je to onaj napon za koji generisana fotostruja ima istu vrednost (suprotnog znaka) kao ukupna struja mraka. Jednačina (3.6) uz najčešću prvu aproksimaciju da je $n = 1$, predstavlja idealnu solarnu ćeliju kod koje redna i paralelna otpornost nisu uzete u obzir. Tada se J_0 obično obeležava sa J_{01} (slučaj kada je $n = 1$) koja nastaje termičkom generacijom i injekcijom manjinskih nosilaca unutar poluprovodnika. Za slučaj n^+ -p- p^+ - spoja, npr. gde je emitorska n^+ -oblast više dopirana od bazne p, može se uzeti da J_{01} nastaje isključivo injekcijom elektrona iz n^+ -oblasti u bazu. Analizirajući teorijsko stnovište J_{01} bi se mogao bezgranično smanjiti povećanjem nivoa dopiranosti baze ($J_{01} \approx 1/N_A$, N_A je koncentracija akceptora u bazi) [77,78,79,128,129].

Eksperimentalno je dokazano da povećanje N_A iznad 10^{17} cm^{-3} dovodi do pogoršanja rada ćelije, smanjenja J_{sc} usred kraćeg vremena života manjinskih nosilaca što je posledica veće dopiranosti materijala. Eksperimentalno je dokazano da je kompromisno rešenje dopiranost baze od 10^{16} - 10^{17} cm^{-3} , jer se tada uspostavlja ravnoteža između kontradiktornih zahteva. Složenost analize se ogleda u tome da se pored elektronske komponente mora uzeti u obzir i struja šupljina injektovanih u n^+ -oblast, koja se iz više razloga ne može analitički

jednostavno opisati. Usled nedovoljnog poznavanja efekta velike dopiranosti materijala u n^+ - oblasti, i činjenice da je ta oblast uglavnom tanka (0,1-0,2 μm), površinska rekombinacija na prednjoj površini se mora uzeti u obzir. Značaj minimiziranja kontaktne površine između metalne mreže i n^+ -oblasti dolazi do izražaja, što ukazuje na neophodnost optimiziranja, dizajna i osobina kontakata. Izrađena struktura sa dodatnim električnim poljem na zadnjoj strani ćelije (najčešće jako dopirana p^+ - oblast), tzv. BSF solarna ćelija, ima veće V_{oc} (za oko 10%) zbog smanjenja rekombinacione struje na zadnjem kontaktu, povećanja J_{sc} i stvaranja dodatnog potencijala između p - p^+ oblasti [77,79,90,91,130].

Opadanje V_{oc} sa porastom temperature je linearno, i pojednostavljenom analizom se dobija da je [90,131]:

$$\frac{\partial V_{oc}}{\partial T} = - \frac{\langle \frac{E_g}{q} - V_{oc} + \frac{3kT}{q} \rangle}{T} \quad (3.8)$$

gde je E_g energetski procep, uz pretpostavku da je $n = 1$ i da sopstvena koncentracija nosilaca najviše (eksponencijalno) zavisi od temperature. Iz date jednačine se može videti da je za ćelije sa manjim V_{os} pad napona sa porastom temperature izraženiji. Tipične vrednosti su oko -2mV/°C [90,131].

Definicioni izraz za V_{os} (jednačine (3.6) i (3.7)) kod njih je $n > 1$ najčešće se primenjuje kod realnih solarnih ćelija. Pojedine konfiguracije solarnih ćelija (p^+ - i - n^+) imaju I-V karakteristiku u kojoj figuriše član $n = 2$ koji je posledica dominacije SRH (Shockley-Read-Hall) rekombinacija u bazi. Isključivanjem članova koji ukazuju na uticaj redne i paralelne otpornosti i uz pretpostavku da je vreme života manjinskih nosilaca konstantno, dobija se izraz analogan jednačini (3.7) gde je $n = 2$. U tom slučaju očekivalo bi se da je napon otvorenog kola veći nego kod ćelija gde je $n < 2$. Pokazalo se da je takva pretpostavka pogrešna, jer je komponenta struje mraka J_{02} mnogo veća od J_{01} , što znatno smanjuje V_{oc} . Svako povećanje faktora idealnosti iznad 1 (pa i iznad 2) povećava rekombinacione struje mraka i čini je znatno većom, istovremeno smanjujući V_{os} [91,92,93,132].

3.3.3.3. Zavisnost efikasnosti (η) od fundamentalnih parametara solarnih ćelija

Efikasnost je parametar koji određuje kvalitet solarne ćelije, kao fotonaponskog generatora napona/struje i izražava se u procentima. Efikasnost η definiše se kao odnos maksimalne snage uređaja P_m i ukupne uložene snage P_s , što je u ovom slučaju sunčev fluks koji u jedinici vremena dolazi na jediničnu površinu ćelije. Ako se uzme u obzir i definicija faktora ispunje ff („mera kvadratičnosti“ I-V karakteristike, tj. količnik maksimalne snage ćelije i proizvoda struje kratkog spoja i napona otvorenog kola – $ff = \frac{P_m}{I_{sc}V_{oc}}$), efikasnost se može povezati i sa ostale tri glavne izlazne karakteristike: ff , J_{sc} , V_{oc} . [94,95,133,134]:

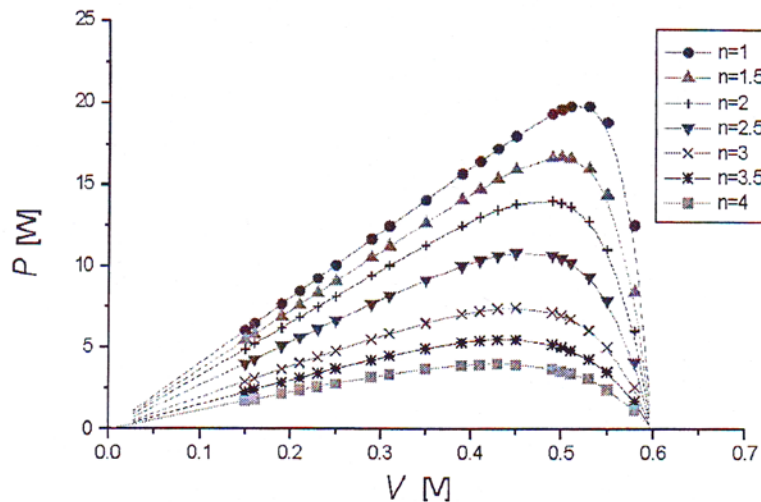
$$\eta = \frac{P_m}{P_s} = \frac{ff J_{sc} V_{oc}}{P_s} \quad (3.9)$$

Jednačinom (3.9) se vidi sposobnost solarne ćelije za pretvaranje dela sunčeve energije u električnu u zavisnosti od mnogih fundamentalnih i tehnoloških faktora, kao što su faktor ispune, gustina struje kratkog spoja i napon otvorenog kola. Jedan od tih faktora je i stvarna spektralna raspodela sunčevog zračenja koju je veoma teško definisati za svaki poseban slučaj, pa se zato najčešće u teorijskim razmatranjima uzima da je $P_s = 100 \text{ mW/cm}^2$. Efikasnost od 22-24% se može realno dobiti dobrom optimizacijom ulaznih parametara solarne ćelije, prvenstveno smanjenjem prekomerne gustine struje zasićenja i gubitaka usled zasenčenja kontaktnom mrežom. Efikasnost predstavlja kombinaciju tri osnovna izlazna parametra solarnih ćelija (ff , J_{sc} , V_{oc}), pa je uzajamno dejstvo tih parametara veoma bitno sa stanovišta analize kvaliteta solarne ćelije i proizvodi sasvim neočekivane rezultate. Tačka maksimalne snage P_m , iz jednačine (3.9) je veličina koja direktno povezuje efikasnost i I-V karakteristiku jer predstavlja proizvod maksimalne gustine struje i napona datog uređaja [94,95,96,134,135]:

$$P_m = J_m V_m \quad (3.10)$$

Ova veličina se najjednostavnije dobija sa grafika zavisnosti izlazne snage od napona (slika 3.8) na kome se najbolja usklađenost otpornosti potrošača sa samim generatorom (solarnom ćelijom) manifestuje kao maksimalna vrednost snage [94].

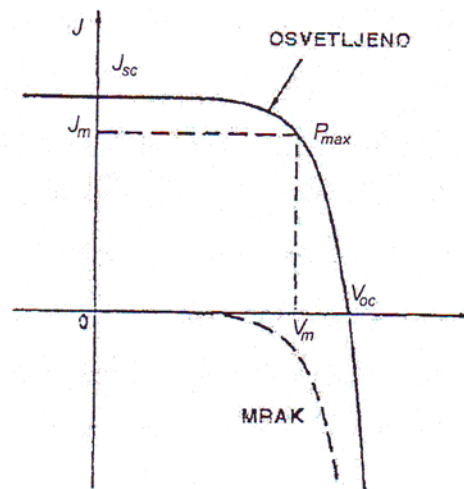
U toku snimanja I-V karakteristike solarne ćelije, kada je otpornost opterećenja (potrošača) izuzetno mala ($\approx 0 \Omega$) solarna ćelija se ponaša kao strujni generator sa strujom jednakom gustini struje kratkog spoja (za idealnu ćeliju). Sa povećanjem otpornosti opterećenja, struja solarne ćelije opada, napon na njenim krajevima raste, a sve više struje teče kroz unutrašnju diodu [95,134,135].



Slika 3.8. Simulacija zavisnosti P-V karakteristika od faktora idealnosti [94]

Za napone veće od 0,4 V, struja ćelije naglo opada, u idealnom slučaju na nulu i tada je napon ćelije jednak naponu otvorenog kola (otpornost ćelije je izuzetno velika). Maksimalna snaga se može dobiti iz tzv. „kolena“ I-V krive (slika 3.9), i za nominalnu vrednost napona otvorenog kola od 0,57 V (za silicijum), tačka maksimalne snage se uglavnom nalazi na naponu većem od 0,45 V [95].

Pošto I-V kriva definiše maksimalnu snagu u zavisnosti od otpornosti, data otpornost koja obezbeđuje maksimalnu snagu mora se održavati na vrednosti koja daje najveću efikasnost. Iz jednačine (3.9) može se utvrditi da je maksimalna snaga glavni ograničavajući faktor za efikasnost, a svako smanjenje struje u tački maksimalne snage na vrednosti manje od J_{sc} vode se kao unutrašnji gubici ćelije [96,97,136,137].



Slika 3.9. Strujno-naponska karakteristika solarne ćelije u mraku i pri osvetljenju [95]

Analiza smanjenja efikasnosti, posmatrano sa fizičkog aspekta prvenstveno se odnosi na refleksiju fotona od površinske ćelije. To smanjuje njihov broj unutar poluprovodničkog materijala, a tim se smanjuje i fotogeneraciju parova elektron-šupljina. Analizom smanjenja efikasnosti za silicijumsku solarnu ćeliju sa faktorom idealnosti jednakim jedinici usled refleksije pokazuje smanjenje ukupne ulazne snage (P_s) za 2%, a usled zasenčenosti gornjom kontaktnom mrežom za 4%. Ako dođe do apsorpcije fotona u antirefleksionom sloju, na defektima i sl., ti fotoni ne učestvuju u stvaranju nosilaca naelektrisanja i izazivaju gubitak snage od 1%. Fotoni koji dođu do unutrašnjosti solarne ćelije a imaju energiju veću od energetskeg procepa datog materijala ($h\nu > E_g$) višak te energije se ni na koju način ne može iskoristiti u fotonaponskoj konverziji, i čini gubitak od čak 29,2%. Fotoni sa energijama manjim od energetskeg procepa ($h\nu < E_g$) prolaze kroz ćeliju ne generišući par elektron-šupljina što čini dalje smanjenje snage za 18,8%. Kada fotoni odgovarajućih energija stvore nosioce naelektrisanja (elektrone i šupljine), nemogućnost samog uređaja (spoja) da te nosioce u potpunosti razdvoji i transportuje do izlaznih kontakata stvara nove gubitke. U najvećem broju slučajeva je $qV_{oc} < E_g$, što je posledica smanjene efikasnosti diode prilikom razdvajanja nosilaca i njihovog prebacivanja preko potencijalne barijere. Sami parametri diode (dubina spoja, debljina n i p spojeva, vreme života i pokretljivost nosilaca i sl.)

određuju mogućnost termalizacije nosilaca i ukoliko nisu na odgovarajući način optimizirani mogu smanjiti efikasnost ćelije za 19,2%. Dubina spoja određuje efikasnost kolekcije nosilaca i ako efikasnost ima vrednost 0,9 (tj. manje od 1), ukupna ulazna snaga će biti manja za 4,5%. Efikasnost kolekcije nosilaca se može povećati smanjenjem dubine spoja, ali kod realnih solarnih ćelija gde postoji i redna i paralelna otpornost tada dolazi do povećanja redne otpornosti, tj. smanjenja faktora ispunje, a tim i efikasnosti. Gubici snage usled redne i paralelne otpornosti (oblika I^2R) najčešće se uvrštavaju u gubitke koji su posledica smanjenja faktora ispunje i u slučaju kada je $ff = 0,78$ iznose 4,7%. Ako se pođe od pretpostavke da je u idealnom slučaju $P_m = P_s$, tj. efikasnost solarne ćelije 100% uzimajući u obzir napred navedene gubitke dobija se konačna vrednost efikasnosti od 16,6%. Pošto je u ovoj analizi korišćena solarna ćelija sa standardnim parametrima, optimizacijom veličina koje utiču na mehanizme gubitaka dovodi do povećanja efikasnosti što je potvrđeno i u praksi (BSF ćelije, teksturisane strukture, plitki spojevi i dr.) [98,99,100,138,139].

U navedenim analizama nije uzet u obzir uticaj faktora idealnosti na efikasnost (smatrano je da je $n = 1$), koji je potvrđen u svim realnim slučajevima. Treba imati u vidu da svi mehanizmi gubitaka neizbežno dovode do povećanja faktora idealnosti i tako indirektno utiču na smanjenje efikasnosti. Postoje slučajevi u kojima je povećanje n kompenzovano dobrim vrednostima drugih veličina, što je na kraju dovelo do postizanja dobre efikasnosti ili faktora ispunje. Glavni cilj optimizacije parametara solarne ćelije ne treba po svaku cenu da bude smanjenje faktora idealnosti, već njegovo podešavanje koje u kombinaciji sa ostalim veličinama daje najbolje reference. Uzroci povećanja faktora idealnosti su mnogobrojni, jer pored zavisnosti od fizičkih veličina tj. transportnih procesa i napona, oni zavise i od tipa spoja. Zanemarujući sve ostale gubitke i uz korišćenje jednačine (3.1), za izlaznu snagu solarne ćelije dobija se [98,100,139].:

$$P = JV = J_0 V \left(\exp \frac{qV}{nkT} - 1 \right) - J_L V \quad (3.11)$$

Diferenciranjem jednačine (3.11) uz uslov da je $dP/dV = 0$, dobijaju se izrazi za napon i struju u tački maksimalne snage tj. [109]:

$$J_m = J_0 \frac{q}{nkT} V_m \exp \frac{qV_m}{nkT} \cong J_L \left(1 - \frac{nkT}{qV_m} \right) \quad (3.12)$$

$$V_m = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{\frac{J_L}{J_0+1}}{1 + \frac{qV_m}{nkT}} \right) \quad (3.13)$$

3.3.3.4. Zavisnost faktora ispunje (ff) od fundamentalnih fizičkih parametara solarne ćelije

Ono što pokazuje meru kvaliteta p-n spoja i njenih performansi jeste svakako faktor ispunje (ff) solarne ćelije. Fil faktor će nam dati jasne naznake o tome u kojoj meri je postojeća solarna ćelija slična idealnoj varijanti solarne ćelije. Drugim rečima, pokazaće uticaj serijskog otpora na efikasnost solarne ćelije.

Faktor ispune (ff) i maksimalna snaga (P_m) solarne ćelije

Jedan od glavnih parametara solarnih ćelija je tzv. „mera kvadratičnosti“ I-V karakteristike, tj. faktor ispune. Faktor ispune (ff) definiše se kao:

$$ff = \frac{P_m}{J_{sc}V_{oc}} \quad (3.14)$$

Maksimalna snaga ćelije P_m , i kao i za ostale izlazne karakteristike solarnih ćelija (J_{sc} , V_{oc}), za idealnu diodu se najčešće smatra da je nezavisan parametar. Međutim, proizvoljnost ovakvog gledišta je očigledna već iz samog definicionog izraza za faktor ispune, zato što veličine V_{oc} , J_{sc} , i P_m u velikoj meri zavise od osnovnih parametara solarnih ćelija (i p-n spojeva uopšte), kao što su redna otpornost, paralelna otpornost, faktor idealnosti i gustina struje zasićenja (R_s , R_{sh} , n , J_0). Naime kod ćelija koje se ne smatraju idealnim, postojanje konačnih vrednosti za R_s i R_{sh} dovodi ne samo do direktnog smanjenja faktora ispune, već i do zavisnosti vrednosti faktora ispune od faktora idealnosti. Čak i samo uvođenje faktora idealnosti i I-V karakteristiku idealne solarne ćelije (jednačina (3.1.)), uz aproksimaciju ($-I_L I = j_{sc}$), bez računanja vrednosti redne i paralelne otpornosti, dovodi do direktnog povezivanja faktora ispune i faktora idealnosti. Najčešće vrednosti faktora ispune kod realnih solarnih ćelija su u opsegu 0,75-0,8 [94,95,140].

Analizirajući jednačinu (3.14) dolazi se do važnog zaključka da faktor ispune zavisi uglavnom od napona otvorenog kola qV_{oc}/nkT , pa bi se jednostavnije određivanje faktora ispune od ostalih parametara ćelije moglo svesti na određivanje zavisnosti V_{oc} od R_s , R_{sh} , n i J_0 . Gustina struje zasićenja J_0 je posledica termičke generacije manjinskih nosilaca u poluprovodniku i treba da je što manja kako bi izlazni napon uređaja (pa i V_{oc}) bio što veći. Povećanje V_{oc} , s druge strane dovodi do povećanja vrednosti faktora ispune. Kod realnih solarnih ćelija, dominantan transportni proces je najčešće kombinacija termionske emisije i rekombinacije u osiromašenoj oblasti, što dovodi do značajnog smanjenja V_{oc} a samim tim i faktora ispune. Pored toga, povišenje temperature uređaja dovodi do znatnog smanjenja V_{oc} usled eksponencijalne zavisnosti J_0 od temperature (porasta I_0), što prouzrokuje veću „zakrivljenost“ I-V karakteristike, tj. smanjenje faktora ispune [94,95,99].

Navedeni parametri imaju nesumnjiv uticaj na faktor ispune bilo kog tipa ćelija (pa čak i „idealne“), ali kod realnih solarnih ćelija (koje su mnogo složenije i po strukturi i po procesima koji se odvijaju u njima), prilikom razmatranja karakteristika i njihovih zavisnosti moraju se uzeti u obzir i dodatni faktori. Prvenstveno to je postojanje redne otpornosti uređaja (pretežno posledica običnog protoka struje u n^+ -sloju i postojanja metalne kontaktne rešetke konačne otpornosti), zatim paralelne otpornosti (usled „curenja“ struje preko spoja) i dodatne komponente struje sa zavisnošću oblika $\exp(qV/nkT)$, gde je n najčešće veće od 2. Strujno-naponska karakteristika takve realne solarne ćelije tada ima oblik dat jednačinom (3.3). Prva tri člana jednačine (3.3) sa desne strane predstavljaju struju mraka čiji eksponencijalni rast sa porastom napona ograničava vrednost V_{oc} (za silicijumske solarne ćelije na oko 0,5-0,6 V), pa je smanjenje parametara koji se pojavljuju u datoj jednačini glavni uslov za minimizaciju struje mraka. Pri tome redna otpornost ima odlučujući značaj, zato što njena vrednost direktno utiče na faktor ispune. Smatra se da je eliminisanje gubitaka usled postojanja redne otpornosti mera uspešnosti dizajna svake pojedinačne ćelije bez obzira

na njenu površinu. Uticaj redne otpornosti se uopšteno može okarakterisati bezdimenzionom veličinom [99,100,101,140]:

$$r = \frac{R_s J_{sc}}{V_{oc}} \quad (3.15)$$

Ovaj parametar omogućava procenu kvaliteta ćelije nezavisno od intenziteta osvetljenja i napona otvorenog kola ćelije. Smanjenje faktora ispunje usled redne otpornosti je tada aproksimativno dato sa:

$$ff = ffo(1 - 1.1r) \quad (3.16)$$

gde je ffo faktor ispunje koji bi mogao da se dobije kada redna otpornost ne bi postojala. Prilikom analize gubitaka u solarnim ćelijama, gubici usled postojanja redne otpornosti se načešće svrstavaju pod gubitke usled smanjenja faktora ispunje, što ukazuje na njihovu veliku povezanost [100,139,140].

Postojanje redne otpornosti (kao i paralelne u izvesnoj meri) kao i opisivanje I-V karakteristike realne solarne ćelije jednačinom (3.3), ukazuje i na postojanje zavisnosti faktora ispunje od faktora idealnosti. Postojanje komponente rekombinacije struje i njena dominacija u pojedinim slučajevima dovodi do promene oblika I-V karakteristike, što se može objasniti povećanjem faktora idealnosti koje dovodi do odgovarajućeg smanjenja faktora ispunje. Pored toga, prisustvo redne i paralelne otpornosti dovodi i do izraženiije zavisnosti faktora ispunje od intenziteta osvetljenja. Pri niskim intenzitetima osvetljenja važnu ulogu igra paralelna otpornost zato što se vrednost struje „curenja“ tada može uporediti sa fotogenerisanom strujom, što u velikoj meri smanjuje i izlazni napon i faktor ispunje. Sa porastom intenziteta osvetljenja, pri konstantnoj temperaturi, faktor ispunje raste do određene granice, kada redna otpornost počinje značajnije da utiče na izlazne karakteristike, ograničavajući (pa čak i smanjujući) faktor ispunje. Iz tog razloga je za rad pri visokim intenzitetima osvetljenja potrebno smanjiti rednu otpornost npr. povećanjem broja linija gornje kontaktne mreže [97,99,139,140].

Bez obzira što je uticaj redne otpornosti na faktor ispunje je izražen u velikoj meri, može se zaključiti da faktor ispunje u većoj ili manjoj meri zavisi od osnovnih parametara solarne ćelije: R_s , R_{sh} i n sa jedne strane, i vrednosti V_{oc} (a samim tim i J_0) s druge strane. U cilju postizanja maksimalno mogućeg faktora ispunje za datu konfiguraciju solarne ćelije, potrebno je povećati napon otvorenog kola i paralelnu otpornost, a smanjiti faktor idealnosti i rednu otpornost. U nekim slučajevima su takvi zahtevi kontradiktorni, pa je optimiziranje dizajna solarnih ćelija složen postupak sa vrlo često neizvesnim ishodom [99].

Na osnovu istraživanja o najvažnijim izlaznim karakteristikama solarnih ćelija: efikasnosti, faktoru ispunje, naponu otvorenog kola, gustini struje kratkog spoja, došlo se do sledećeg zaključka:

1). Struja koja teče kroz spoljašnje strujno kolo dok su elektrode solarnih ćelija kratko spojene se naziva struja kratkog spoja (J_{sc}). Ovakva struja je srazmerna jačini upadnog sunčevog zračenja i, pri nultom naponu, ona proizvodi maksimalnu vrednost struje solarnih ćelija. Struja kratkog spoja se povećava sa povećanjem jačine upadnog Sunčevog zračenja i zavisi isključivo od površine solarnih ćelija. Jačina sunčevog zračenja je u vezi sa

povećanjem intenziteta upadnog sunčevog zračenja. Ono što može smanjiti jačinu struje kratkog spoja jeste prašina koja se taloži po površini solarnih ćelija. Jačina sunčevog zračenja koja dospeva do ploča se smanjuje usled povećanog taloženja prašine na samim pločama, dok se automatski smanjuje i intenzitet struje kratkog spoja.

2). Maksimalna vrednost napona koja se javlja na krajevima solarne ćelije u kolu u kome nema proticanja struje (otvoreno električno kolo) se naziva - napon otvorenog kola (V_{oc}). Kako temperatura solarnih ćelija raste tako se smanjuje intenzitet napona otvorenog kola. Prašina koja se taloži po površinama solarnih ćelija nema neki značajniji uticaj na ovaj napon. Intenzitet ovog napona ostaje konstantan i ne zavisi od promene jačine sunčevog zračenja, osim u slučajevima kada je jačina ovog zračenja manja od 100 W/m^2 . U takvim situacijama se intenzitet ovog napona značajno smanjuje.

3). Odnos između dve vrste energija – iskorišćena energija i ukupna energija sunčevog zračenja koja pada na solarne ćelije, se naziva efikasnost solarne ćelije (η). Ukoliko se vrednost V_{oc} -a i J_{sc} -a povećava dok je vrednost ff jednaka jedinici, povećava se i efikasnost solarnih ćelija. Ova efikasnost zavisi od temperature solarnih ćelija kao i od jačine sunčevog zračenja. U skladu s tim, ona opada kada se smanjuje jačina sunčevog zračenja i kada raste temperature solarnih ćelija.

4). Jedan od važnih pokazatelja performansi solarnih ćelija kao i mera kvaliteta p-n spoja jeste fil faktor solarne ćelije (ff). On nam konkretno pokazuje u kojoj meri su postojeće solarne ćelije bliske idealnim verzijama, drugim rečima predstavlja nam količinu uticaja serijskog otpora na efikasnosti solarnih ćelija. Ovaj faktor u mnogome zavisi od promene napona otvorenog kola. Treba naglasiti, da su značajnije promene ovog napona jako retke u solarnim pločama. Postoji direktna povezanost između fil faktora, serijskog otpora i temperature. Dok temperature solarnih ćelija raste, fil faktor se smanjuje što nas dovodi do zaključka da veća vrednost fil faktora odgovara maloj vrednosti serijskog otpora. Vrednost fil faktora je uglavnom od 0,7 pa sve do 0,9.

Činjenica je da se jačina električne snage u nekoj tački strujno naponske karakteristike solarnih ćelija dobija proizvodom struje i napona. Takođe, postoji linearna zavisnost između maksimalne snage solarne ćelije (P_m) i jačine sunčevog zračenja. Maksimalna snaga se smanjuje dok temperature solarnih ćelija raste. Ako krenemo od toga da taloženja prašine na solarnim pločama smanjuju intenzitet struje kratkog spoja, a da proizvod struje i napona daje vrednost snage solarnih ćelija, zaključujemo da se ova snaga solarnih ćelija značajno smanjuje usled taloženja prašine na solarnim pločama.

Na osnovu zaključne analize izlaznih karakteristika solarnih ćelija, mogle bi se razmotriti karakteristike fotonaponskih solarnih ćelija (panela) radi odabira najboljih karakteristika za moguće napajanje električnom energijom nisko-energetskih objekata.

3.4. Solarne fotonaponske tehnologije

Električni uređaji koji energiju sunčeve svetlosti transformišu direktno u električnu energiju se nazivaju fotonaponski sistemi. Fotonaponski sistemi se takođe nazivaju i solarne ćelije. Godine 1954. u „Bell Telephone Laboratories“ došlo je do kreiranja moderne verzije solarnih ćelija. Očekuje se da će fotonaponski sistemi imati jednu od glavnih uloga u

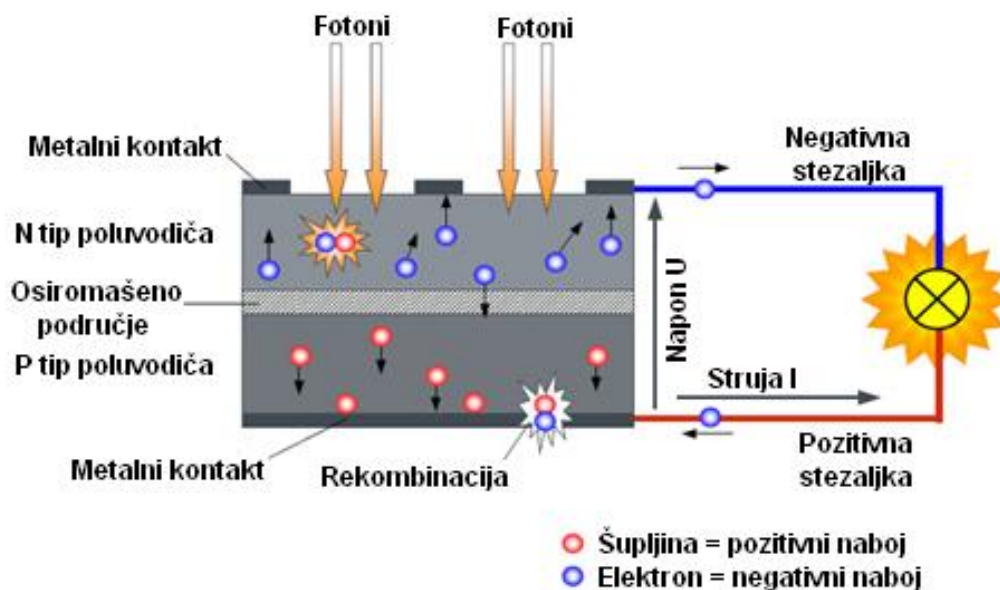
narednom periodu globalne proizvodnje električne energije. Trenutno se ova tehnologija najbrže razvija od svih tehnologija obnovljive energije. U narednom delu će biti navedene samo neke od brojnih prednosti fotonaponske tehnologije: [50,51,141]:

- Solarna energija je dostupna svuda u svetu;
- Ova tehnologija se može koristiti gotovo svuda jer su izrazito modularne u odnosu na sve ostale tehnologije obnovljivih izvora energije;
- Solarnu energiju karakterišu relativno niski troškovi održavanja i operativni troškovi, i pored toga ne postoje troškovi za gorivo. Samim tim, možemo zaključiti da fotonaponski sistemi stvaraju stabilnu cenu u odnosu na cenu fosilnih goriva;
- Kapacitet fotonaponske tehnologije u velikoj meri ispunjava visoke zahteve potražnje električne energije.

Fotonaponski modul se sastoji od grupisanih fotonaponskih ćelija od kojih se sastoji fotonaponski sistem. Tu su i pomoćne komponente kao što je nadzor, inverter i ostalo. Veliki broj različitih tehnologija fotonaponskih ćelija će biti uskoro dostupan. Međutim, i na trenutnom tržištu postoji veliki spektar različitih tehnologija ove vrste. U zavisnosti od osnovnog materijala koji se koristi na tržištu, tehnologija fotonaponskih ćelija je uglavnom podeljena na tri generacije[51,52,53,141]:

- Kada je reč o tehnologiji koja se bazira na pločama kristalnog, monokristalnog ili polikristalnog silicijuma (c-Si, sc-Si ili mc-Si), ona je potpuno komercijalizovana i pripada prvoj generaciji FN sistema;
- Kada je reč o tehnologiji koja se bazira na tankoslojnim FN tehnologijama uključujući tri glavne grupe, onda ona pripada drugoj generaciji FN sistema. Prva grupa bi bila amorfni i mikromorfni silicijum, druga kadmijum-telurid, a treća bakar-indijum-selenid i bakar-indijum-galijum-diselenid. Ova generacija se nalazi u stadijumu početnog razvoja na tržištu;
- Treću generaciju FN sistema odlikuju tehnologije sa koncentrisanim FN ćelijama i organskim FN ćelijama. One još uvek nisu široko komercijalizovane jer su uglavnom u procesu testiranja i razvitka novih koncepata.

Fotonaponske (n-p) ćelije, slika 3.10, su ćelije debljine 0,20 do 0,25 mm koje se oblikuju kristalima silicijuma i to tako što se na jednoj strani stvara tzv. n strana difuzijom fosfora, dok sa druge strane nastaje p strana koja je obogaćena atomima bora. Iako je osnova velikog broja FN ćelija monokristalni ili polikristalni silicijum, ova vrsta silicijuma ima visok stepen čistoće [58,59]. Silicijum je vrlo dobar poluprovodnik i prisutan je u velikim količinama na našoj planeti. Kristalni silicijum visokog stepena čistoće ima veliki električni otpor. Ovaj otpor se u proizvodnji smanjuje primenom različitih tehnoloških procesa (doping, difuzija) sve do željene poluprovodničke vrednosti. Usled svetlosti koja pada na tako oblikovanu poluprovodničku ćeliju, stvaraju se elektroni i rupe (parovi negativnih i pozitivnih naboja). Električno polje na granici n-p spoja razdvaja elektrone i rupe tako da do n elektroda putuju negativni elektroni, a do p elektrode putuju pozitivne rupe. [58,59,60,142].



Slika 3.10. Proces rekombinacije u solarnoj ćeliji [58]

Ukoliko dođe do spajanja n i p elektroda pomoću provodnika zanemarljivo malog otpora nastaje struja kratkog spoja. Ova struja je proporcionalna količini energije koje stvara sunčevo zračenje kada padne na n stranu ćelije.

Nakon što je ukratko dat uvod o prednostima solarnih ćelija i kategorizacija istih, razmatraćemo svaku generaciju FN tehnologija ponaosob.

3.4.1. Prva generacija solarnih ćelija: solarne ćelije kristalnog silicijuma

Silicijum je pogodan za FN aplikacije jer je dobar poluprovodnički materijal i jer je jedan od najzastupljenijih elemenata na našoj planeti dok raspolaže energetski zabranjenim pojasom od 1,1eV [50]. U skladu sa tim, materijali kao što je kristalni silicijum se najčešće koriste u ovoj industriji. Ćelije i moduli koji dominiraju na trenutnom tržištu su, shodno s tim, bazirani na c-Si pločama. Ova tehnologija se već razvila u elektronskoj industriji, te raspolaže akumuliranom bazom znanja koja je itekako razvijena u elektronskoj industriji. Planirana je proizvodnja ovih vrsta solarnih ćelija i u masovnoj proizvodnji. Dok će ove iste ćelije proizvoditi i pojedinačne kompanije po stopi od nekoliko stotina MW godišnje pa sve do GW-razmera.

Postoji četiri koraka od kojih se sastoji proizvodni proces pločastih FN silicijumskih modula [50,51,142]:

- 1) polisilicijumska proizvodnja;
- 2) proizvodnja poluga/ploča;
- 3) proizvodnja ćelija i
- 4) montaža modula.

U trenutku kada je japanska kompanija „Sharp“ instalirala 242-vatni (W) FN modul na svetioniku (što je bila najveća svetska komercijalna FN instalacija u tadašnje vreme) i počela proizvoditi komercijalne FN module, počela je i komercijalna proizvodnja c-Si. To se sve dešava 1963. godine. U 2010. godini, tehnologija sa kristalnim silikonima imale su procenat od oko 87% globalne FN prodaje. Efikasnosti ovih modula mogu da variraju od 14% do 19% (prikazano u Tabeli 3.1). I pored toga što je ova tehnologija komercijalizovana, kontinuirano smanjenje troškova će omogućiti stvaranje većeg izbora materijala i više proizvodnih procesa. Do sada je ovakva praksa podstakla pojavu raznovrsnih i brojnih proizvodnih objekata [56,57,59,142].

Iz prethodnog se zaključuje da prvu generaciju solarnih ćelija čine solarne ćelije kristalnog silicijuma, čija efikasnost varira od 14% do 19%. Karakteristike druge generacije su analizirane u narednom podpoglavlju.

3.4.2. Druga generacija solarnih ćelija: tankoslojne solarne ćelije

Korišćenje tankoslojnih solarnih ćelija u značajnim količinama je započeto nakon 20 godina istraživanja i razvoja. Postoji potencijal da ovakve solarne ćelije mogu obezbediti pristupačniju i jeftinu električnu energiju u poređenju sa c-Si solarnim ćelijama bazirane na pločama. Sa druge strane, niži kapitalni troškovi se zbog troškova materijala i slabije proizvodnje ravnaju sa nižom efikasnošću u određenoj meri. Tako da veoma nizak trošak vezan za c-Si module čine ovu ekonomiju još izazovnijom.

Tankoslojne solarne ćelije se sastoje od sukcesivnih tankih slojeva, debljine samo 1 do 4 μm , ili su solarne ćelije nanete na velike, jeftine supstrate kao što su staklo, polimer ili metal. Kao posledica prethodnog, za njihovu proizvodnju se zahteva mnogo manje poluprovodničkog materijala kako bi apsorbivali istu količinu sunca (do 99% manje materijala nego kristalne solarne ćelije) [57,59].

Prednost tankih slojeva od kojih se sastoje tankoslojne ćelije je ta što se mogu pakovati u fleksibilne i lagane strukture. Te strukture se mogu lako integrisati u delove objekata tj. postaju FN intergisane u objekte. Postoje tri glavne vrste komercijalizovanih tankoslojnih solarnih ćelija: 1) kadmijum telurid (Cd-TE), 2) amorfni silicijum i bakar-indijum-selenid (CIS) i 3) bakar-indijum-galijum-diselenid (CIGS) [57,59,143]:

- 1) Ćelije koje imaju najveću efikasnost i najmanje troškove proizvodnje su solarne kadmijum telurid tankoslojne FN ćelije. Efikasnost ovih ćelija je do 16,7% veća od drugih ćelija tankoslojne tehnologije. [48]. Bar jedan potrošač je korišćenjem ovih ćelija imao troškove manje od 0,75 USD/W što ih čini trenutno najekonomičnijom tankoslojnom tehnologijom dostupnom na tržištu [48]. Kadmijum i telurijum su dve glavne sirovine u sastavu ovih ćelija. Kadmijum dobijamo obradom cinka, a telurijum obradom bakra. Loša strana je to što telurijum može da se proizvodi u značajno manjim količinama od kadmijuma i to predstavlja problem. Dok kod kadmijuma postoji problem sa većim nivoom toksičnosti koji može da ograniči njegovu upotrebu [46,48].

- 2) Jedne od najrazvijenijih i najpoznatijih tankoslojnih solarnih ćelija su svakako amorfne silicijumske solarne ćelije. Ova tehnologija značajno smanjuje troškove proizvodnje samim tim što je ova tehnika bazirana na taloženju, a amorfni silicijum može da se nanese na veoma velike i jeftine supstrate. Ti supstrati mogu biti i do 5,7 m stakla. Trenutno se razvijaju lagani i fleksibilni a-Si moduli izuzetno pogodni za površine koje su ravne i zaobljene (npr. krovovi i fasade). Trenutna efikasnost ovih modula je u rasponu od 4% do 8% [44]. Dok, veoma male ćelije ove vrste i to još uvek na laboratorijskom nivou dostižu efikasnost i do 12,2% [45]. Najveća mana ovih solarnih ćelija je ta što sunce degradira njihove performanse tako da one ispoljavaju povećano smanjenje izlazne snage (tokom određenog period od 15% do 35%). Iako bi tanji slojevi mogli da povećaju snagu električnog polja upotrebom tanjih materijala i da pruže stabilniju i veću izlaznu snagu, ovim se smanjuje apsorpcija svjetlosti a time i efikasnost ćelije [45].
- a. Multispojni tankoslojni silicijum (a-Si/ μ c-Si) (sastoji se od a-Si ćelije, dodatnih slojeva a-Si i mikrokristalnog silicijuma (μ c-Si)) predstavlja kvalitetniju varijantu amorfno silicijumskih solarnih ćelija. Njegova prednost je u tome što μ c-Si sloj apsorbuje veću količinu svetlosti od infracrvenog i crvenog dela svetlosnog spektra. Ovim se povećava efikasnost ćelije i do 10%. Takođe treba spomenuti i to da je debljina ovog sloja 3 μ m što čini ćeliju stabilnijom i debljom. [44,46,47].
- 3) Fotonaponske ćelije koje pružaju najveću efikasnost od svih tankoslojnih FN tehnologija jesu bakar-indijum-selenid i bakar-indijum-galijum-diselenid (CIS i CIGS). Sprovedena je uspešna komercijalizacija u proizvodnji CIS solarnih ćelija od strane mnogih firmi. Ova proizvodnja je nastala u saradnji sa mnogim univerzitetima ("Würth Solar", „Solibro“, „Miasole“, „Nanosolar“, „Avancis“, „Solar Frontier and Honda Soltec“) [49]. Trenutna efikasnost modula je u rasponu od 7% do 16% dok je efikasnost u laboratorijskim uslovima dostigla 20,3%. U trci za povećanje efikasnosti komercijalnih modula, CIGS proizvođač „Solar Frontier“ je dostigao godišnji proizvodni kapacitet od 1 GW 2010. godine. [49].

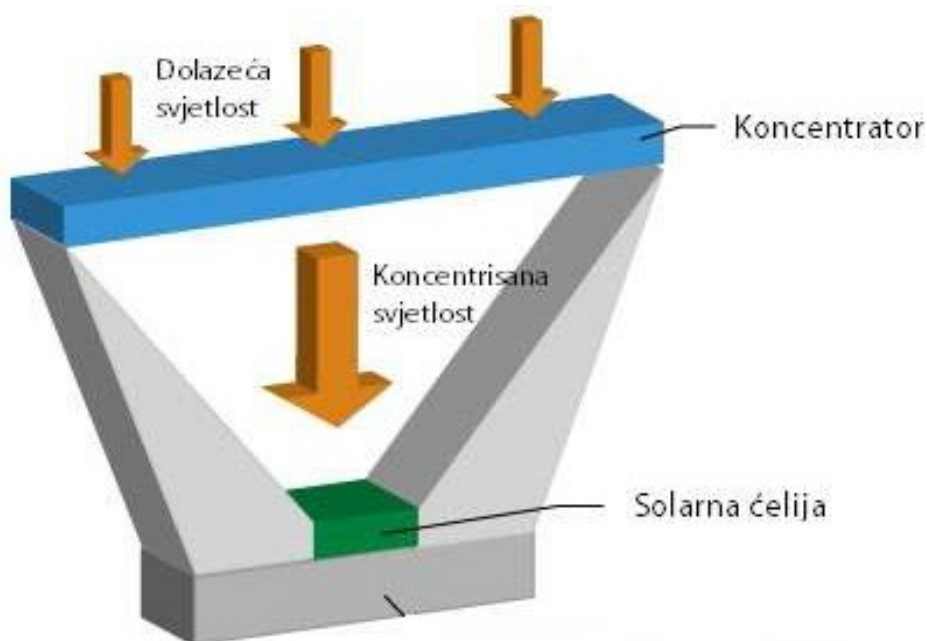
Na osnovu prethodnih informacija možemo zaključiti da se tankoslojne solarne ćelije počinju koristiti u značajnim količinama nakon 20 godina istraživanja, ali zbog troškova proizvodnje još uvek ne u toj meri kao solarne ćelije kristalnog silicijuma. Takođe, njihova proizvodnja zahteva upotrebu manje količine poluprovodničkog materijala da bi se apsorbivala ista količina sunca u odnosu na proizvodnju kristalnih solarnih ćelija. Prednost tankih slojeva je ta što se mogu pakovati u fleksibilne i lagane strukture, i lako se integrišu u delove različitih objekata. Postoje komercijalizovane tri glavne vrste tankoslojnih solarnih ćelija. Prve su amorfni silicijum (a-Si i a-Si/ μ c-Si), druge kadmijum telurid (Cd-TE), dok je treća vrsta bakar-indijum-selenid (CIS) i bakar-indijum-galijum-diselenid (CIGS).

3.4.3. Treća generacija solarnih ćelija

Treća generacija FN tehnologija se nalazi u predkomercijalnoj fazi razvoja i još uvek zavisi od tehnologije koja se testira. To su neki novi koncepti koji ne mogu da funkcionišu bez osnovnih istraživanja i razvoja iliti kvantnih struktuiranih FN ćelija. Iako je u toku komercijalizacija određenih fotonaponskih tehnologija treće generacije ostaje da se vidi koliko će biti uspešnost u osvajanju dela tržišta od već postojećih tehnologija. Najpopularnije tehnologije fotonaponske treće generacije ćelija su organske solarne ćelije, solarne ćelije osetljive na boju, koncentrisane fotonaponske ćelije kao i novi i nastajući koncepti [50,51,52,53,144].

3.4.3.1. Koncentrisani solarni (CPV) sistem

Kako bi se direktni sunčevi zraci koncentrisali na veoma male i visoko efikasne višespojne solarne ćelije sačinjene od poluprovodničkog materijala, u tehnologiji koncentrisanih FN sistema koriste se optički uređaji - sočiva i ogledala. [50,54,144]



Slika 3.11. Koncentrisani solarni (CPV) sistem [54]

Postoje niski, srednji i visoki faktori koncentrisanosti sunčeve svetlosti. Niski i srednji se rangiraju od 2 do 100 SU, dok faktor visoke koncentracije iznosi do 1000 SU [54]. Da bi sočiva bila efikasna, ona moraju biti konstantno okrenuta prema suncu. To se postiže tako što se koriste sistemi praćenja po jednoj ili dve ose u zavisnosti od toga da li je u pitanju niska ili visoka koncentracija. Za sisteme određenih dizajna koncentrisanih

fotonaponskih ćelija (slika 3.11) potrebno je hlađenje koje može biti aktivno ili pasivno. Dok se kod drugih novijih pristupa, hlađenje može izbeći.

Postoji mogućnost da se niski i srednji koncentrisani sistemi, oni do 100 SU, kombinuju sa silicijumskim solarnim ćelijama. U tom slučaju više temperature mogu smanjiti njihovu efikasnost. Visoki koncentrisani sistemi, iznad 500 SU, su uglavnom povezani sa višespojnim solarnim ćelijama koje su napravljene od poluprovodničkih materijala galijum arsenida. On nudi najveću FN efikasnost pretvaranja [51,55,56]. Solarne ćelije koje se sastoje od većeg broja slojevitih p-n spojeva se nazivaju višespojne (iliti „dvostruki“, „trostruki“ spoj). Slojeviti p-n spojevi su napravljeni od različitog skupa poluprovodnika, sa različitom spektralnom apsorpcijom i zabranjenim pojasom. Na taj način oni apsorbuju veliku količinu solarnog spektra. Inače, materijali koji se najčešće koriste jesu Ge (0,67 eV), InGaAs (1,4 eV), GaAs, InGaP (1,85 eV) [57,144]. Teoretska efikasnost koja bi se dostigla pri korišćenju ćelija sa trostrukim spojem koje imaju zabranjeni pojas od 0,74, 1,2 i 1,8 eV bi bila 59% [57,58]. Usled kompleksnosti ovih ćelija kao i troškova njihove proizvodnje, višespojni sistemi se koriste za solarne ćelije na malim područjima koje imaju visoku koncentraciju sunčevog zračenja.

Efikasnost komercijalnih CPV modula sa ćelijama baziranim na pločama pružaju efikasnost u rang od 20% do 25%. Laboratorijaska efikasnost CPVa baziranom na višespojnim solarnim ćelijama (one koriste poluprovodnike iz 3. i 4. grupe periodnog sistema) je iznad 40%. Efikasnost komercijalnih višespojnih uređaja proizvedenih od strane nekoliko kompanija („Sharp“, „Emcore“, „Spectrolab“ i „Azur“) je 35%. Ovaj procenat je značajno veći u odnosu na konvencionalne jednospojne c-SI solarne ćelije. Kontinuirano istraživanje i razvoj ima veliki potencijal da poveća CPV efikasnosti od 45% do 50% [59,60,144].

CPV moduli trebaju biti konstantno okrenuti ka suncu kako bi se maksimalno povećala proizvodnja električne energije. Konstantna orijentisanost ka suncu se postiže korišćenjem sistema praćenja po jednoj ili dve ose. Ti isti sistemi praćenja zajedno sa višespojnim solarnim ćelijama čine da upotreba CPV modela bude skupa u poređenju sa konvencionalnim fotonaponima. Ono što može nadoknaditi visoke troškove jeste njihova veća efikasnost i manja površina aktivnog materijala. Preporuka je da se CPV moduli koriste u regijama sa vedrim nebom i visokim intenzitetom direktnog sunčevog zračenja jer su zavisni od direktne sunčeve svetlosti.

3.4.3.2. Solarne ćelije osetljive na boju

Ovde se govori o tipu solarnih ćelija osetljivih na boju, a koje koriste foto-elektrohemijske solarne ćelije, koje su bazirane na poluprovodničkim strukturama. Kod ovih ćelija se poluprovodnička struktura formira između fotoosetljive anode i elektrolita.

U tipičnim ćelijama ove vrste, antene koje skupljaju fotone su zapravo poluprovodnički nanokristali, a molekuli boje su odgovorni za fotostruju (razdvajanje naboja). Ono što ih čini jedinstvenim je njihova sposobnost da oponašaju prirodnu fotosintezu. Solarni ćelije osetljive na boju su atraktivne i zbog toga što su jednostavne za

proizvodnju i koriste jeftine materijale. One mogu da oslobode elektrone iz titan-dioksida koji je prekriven pigmentom za apsorpciju svetlosti. Sa druge strane, izloženost UV svetlosti nakon određenog vremena može smanjiti njihove performanse, dok je upotreba elektrolita nepreporučljiva kada postoji visoki rizik od smrzavanja.

Uglavnom zahvaljujući razvoju inovativnih širokopojasnih bojila kao i elektrolita, postignuta je laboratorijska efikasnost od 12%. Sa druge strane, niska je komercijalna efikasnost i obično iznosi od 4% do 5% [61,62,143,144]. Jedan od glavnih razloga niske komercijalne efikasnosti ovih ćelija je ta što vrlo mali broj boja može apsorbovati široko spektralno područje. Upotreba nanokristalnih poluprovodnika predstavlja jedno interesantno polje koje se i dalje istražuje. Ono bi omogućilo da ovakve ćelije dobiju široku pokrivenost spektra. U istom cilju je na hiljade organskih boja proučavano i testirano. Takođe, teži se ka tome da se kreiraju nanostrukturni materijali, tako što bi bilo sprovedeno njihovo sintetiziranje, sembliranje i dizajniranje.

3.4.3.3. Organske solarne ćelije

Ćelije koje se sastoje od polimernih ili organskih materijala se nazivaju organske solarne ćelije. Ti materijali mogu biti mali organski molekuli ili organski polimeri tako da se od toga naprave jeftine ćelije koje nisu efikasne. Poslednjih godina je međutim došlo do brojnih važnih poboljšanja koja su povećala njihovu efikasnost. U laboratorijama je efikasnost ovih ćelija od 6% do 8%, dok se u komercijalnim sistemima kreće od 4% do 5% [52,63,143,144,145].

Pored neefikasnosti, nestabilnost koja dolazi s promenom vremena predstavlja glavni izazov za kvalitetno funkcionisanje ovih ćelija. U proizvodnji organskih ćelija se koriste procesi velikih brzina i niskih temperatura sa standardnom tehnologijom štampanja. Samim tim su organske solarne ćelije veoma konkurentne na tržištu. Očekivano je da će proizvodni troškovi nastaviti da se smanjuju i da će dostići vrednost od 0,50 USD/W do 2020. godine [64,143,144,145].

Organske ćelije su fleksibilne i lagane samim tim što se mogu naneti na plastične folije koristeći način sličan onom u industriji za štampu. Ovo ih čini idealnim kada je u pitanju izrada mobilnih aplikacija i njihova ugradnja u razne površine koje su neravne. Ono što ih čini veoma traženim na tržištu jeste upotreba vezana za prenosne aplikacije. Ovi moduli mogu biti instalirani u gotovo bilo koji uređaj i mogu se odložiti kada se ne upotrebljavaju tako što se smotaju ili saviju. Ovakve karakteristike modula će na neki način napraviti revoluciju u ovoj oblasti jer će obogatiti količinu oblika i uopšte primenu fotonaponskih sistema. Ne smemo zaboraviti ni njihovu primenu kada su u pitanju baterijski punjači, laptopovi, prijemnici, svetiljke, igračke i gotovo svi ručni uređaji koji koriste baterije. Takođe, prednost ove tehnologije je ta što koristi obilne, neotrovne materijale, a proces proizvodnje je visoko produktivan [65,143,14,145].

3.4.3.4. Razvoj novih solarnih ćelija

Brojni novi koncepti solarnih ćelija su u razvoju. Oni se uglavnom oslanjaju na upotrebu kvantnih tačaka, jama, dok postoje i one koje su u vezi sa tehnologijama super rešetki. Budući da je karakteristika ovih ćelija sposobnost da se prevaziđu termodinamička ograničenja konvencionalnih ćelija, ove ćelije će se koristiti u proizvodnji koncentrisanih fotonaponskih tehnologija. Treba ipak imati u vidu da su temeljni materijali i dalje u fazi istraživanja i da su oni najdalje od procesa komercijalizacije. Međutim, ovi visokoefikasni pristupi su u fazi istraživanja temeljnih materijala. Nanotehnologija, kao jedna od novijih nauka, će takode doprineti tome da se aktivni sloj menja i da se polje podudara sa sunčevim spektrom [65,143,144,145].

3.4.4. Poređenje solarnih fotonaponskih ćelija

Na osnovu analiziranih glavnih karakteristika tri generacije solarnih ćelija, dato je poređenje istih u tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Poređenje glavnih karakteristika tri generacije solarnih ćelija

	Prva generacija solarnih ćelija		Druga generacija solarnih ćelija			Treća generacija solarnih ćelija		
Solarne ćelije	Monokristalni silikon (sc-Si)	Poli-kristalni sili-kon (pc-Si)	Amorfni sili-kon (a-Si)	Bakar-indijum-galijum-diselenid (CIS/CIGS)	Kadmijum telurid solarne ćelije (CdTe)	Koncentrisane FN ćelije	Solarne ćelije osjetljive na boju	Organske solarne ćelije
Najbolja istraživačka efikasnost solarne ćelije pri AM 1,5* [%]	24,7	-	10,4 jedno-spojni 13,2 dvospojni	20,3	16,5	43,5	11,1	11,1
Potvrđena efikasnost solarne ćelije pri AM 1,5 [%]	20-24	14-18	6-8	10-12	8-10	36-41	8,8	8,3
Efikasnost komercijal-nog FN modula pri AM 1,5 [%]	15-19	13-15	5-8	7-11	8-11	25-30	1-5	1
Potvrđena maksimalna efikasnost FN modula [%]	23	16	7,1/ 10,0	12,1	11,2	25	-	-
Trenutni troškovi FN modula [USD/W]	< 1,4	< 1,4	~ 0,8	~ 0,9	~ 0,9	-	-	-

Tržišni udeo u 2017. godini [%]	83	3	1	13	-	-	-	-
Tržišni udeo u 2018. godini [%]	87	2	2	9	-	-	-	-
Maksimalna izlazna snaga FN modula [%]	-	320	300	120	120	120	-	-
Veličina FN modula [m ²]	2,0	1,4-2,5	1,4	0,6-1,0	0,72	-	-	-
Potrebna površina po kW [m ²]	7	8	15	10	11	-	-	-
Stanje komercijalnosti	potpuna sa proizvodnjom velikih razmera	potpuna sa proizvodnjom velikih razmera	u toku razvoja, srednji nivo proizvodnje	u toku razvoja, srednji nivo proizvodnje	u toku razvoja, nizak nivo proizvodnje	komercijalizovana, nizak nivo proizvodnje	u toku istraživanja i razvoja	u toku istraživanja i razvoja

*Napomena: Testiranje je vršeno pri zahtevanim standardnim merama, koje zahtevaju temperaturu vazduha 25°C, pri jačini svetlosti od 1000W/m², vazдушna masa 1,5.

Na osnovu prethodnog istraživanja analizirana je efikasnost različitih tipova solarnih ćelija za materijalizaciju nisko-energetskih objekata. Iz analize (Potpoglavlje 3.4.4., tabela 3.1), se vidi da su monokristalne solarne ćelije najskuplje ali zato je njihov koeficijent efikasnosti najveći. Polikristalne imaju nešto manji koeficijent efikasnosti i predstavljaju alternativu monokristalnim (mada je tehnologija potpuno različita), dok amorfne solarne ćelije imaju najnižu efikasnost, svega 6-10% ali zato je njihova cena najmanja. Amorfni silicijum je pogodan za nanošenje na razne materijale tako da se proizvode i ćelije sa promenljivom planarnošću (nanosi se na plastične filmove).

Na osnovu navedenog, zaključak bi bio sledeći. Radi provere istinitosti o kvalitetu materijala za izradu FN solarnih ćelija za materijalizaciju naših objekata, sve u cilju postizanja veće energetske efikasnosti kao i isplativosti, ispitaće se primena FN solarnih panela izrađenih od monokristalnih silicijumskih solarnih ćelija (ss-Si), na karakterističnim Objektima (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), potom će se na jednom modelu (Prvi Objekat), integrisati kadmijum-telurid (Cd-TE) i bakar-indijum-selenid (CIS) (druga generacija solarnih ćelija), da bi se utvrdili dobijeni rezultati efikasnosti analiziranih u tabeli 3.1. Pored toga, u ovom poglavlju prikazane su osnove funkcionisanja fotonaponske konverzije energije i metode za karakterizaciju njihovih karakteristika, relevantnih za određivanje primenljivosti u građevini za nisko-energetske objekte. Od postojećih metoda karakterizacije izabrane su solarne ćelije (ss-Si), (Cd-TE) i (CIS), koje su bile po nama, najbolje za posmatranu problematiku. Iz prethodno prikazanog materijala je jasno da mogućnost primene solarnih ćelija za nisko-energetske objekte, u najvećoj meri je uslovljena klimatskim uslovima, koji određuju kako energetska efikasnost ove vrste napajanja, tako i njenu isplativost.

Na osnovu toga, sledi poglavlje četiri, u kome se vrši odabir nisko-energetskih objekata kao mogućih modela za napajanje električnom energijom iz fotonaponskih

(solarnih) ćelija. Nisko-energetski objekti će se analizirati prema geoprostornim parametrima, kao i parametrima bioklimatske arhitekture (podpoglavlje 2.6. ovog rada). Nakon izvršene karakterizacije nisko-energetskih objekata prelazi se na ispitivanje primenljivosti odabranih solarnih ćelija (analiza tabele 3.1) u predviđenom cilju.

POGLAVLJE 4

MATERIJALIZACIJA NISKO-ENERGETSKIH OBJEKATA FN SOLARNIM PANELIMA

4.1. Uvod

Da bi se moglo razmatrati napajanje nisko-energetskih kuća električnom energijom iz odabranih fotonaponskih (solarnih) ćelija, potrebno je razmotriti geoprostorne i bioklimatske karakteristike odabranih modela nisko-energetskih kuća. Potom, izvršiti ispitivanje primenljivosti solarnih ćelija na fasade objekata, kao novog materijala.

Klimatski uslovi su oduvek bili značajni faktori prilikom planiranja, projektovanja i definisanja građenog prostora. Od najranijih dana ljudi su instinktivno prilagođavali materijale, tehniku i građenu formu lokalnim klimatskim uslovima. Razvoj tehnologije početkom 20. veka, međutim, omogućio je arhitekturi veću nezavisnost od klimatskih uticaja. U tom smislu, primena tehnoloških inovacija omogućila je gradnju objekata u sredinama u kojima to ranije nije bilo moguće (npr. stvaranje poljoprivrednog zemljišta oduzimanjem tla od mora u Holandiji, nastanak čitavih gradova „na pesku”, kao što su Abu Dabi, Dubai i dr., pa sve do paradoksalnih primera klizališta i skijališta u tržišnim centrima u uslovima gde je spoljna temperatura +40). Utrošak velike količine energije i negativni uticaji na životnu sredinu, zatim i ekonomska i energetska kriza, ukazali su da je ovakav pristup neodrživ. Danas, arhitekturom dominira simbioza objekta sa okruženjem i vraćanje iskustvima iz prošlosti, ali uz korišćenje savremenih tehnoloških rešenja kojima se principi energetske održivosti implementiraju u svim fazama planiranja i projektovanja.

Stambeno-poslovni objekti, potrošači energije, koja se najvećim delom troši na neefikasno grejanje prostora, potrošnju električne energije. Turizam se tokom druge polovine dvadesetog veka naglo razvijao i postao jedna od najznačajnijih privrednih grana na globalnom nivou. Neophodno je da se smanji svako prekomerno trošenje fosilne energije sagorevanjem gde se kao prioritet javlja očuvanje prirodne komponente područja. Potrošnja energije u stambeno-poslovnim objektima pored ekološkog, veliki uticaj i na ekonomski i energetske bilans zemlje. Ovi objekti svoje energetske potrebe zadovoljavaju uglavnom na klasičan način. U njihovoj strukturi troškova najveći deo odlazi na energiju (grejanje zatvorenih prostora i vode, osvetljenje, održavanje ventilacionih sistema, itd.).

Zaključujemo sledeće. Predmet istraživanja ovog rada je prikaz moguće primene FN solarnih panela na stambeno poslovne objekte u cilju postizanja veće uštede energije, samim tim većeg komfora stanovanja, kao i isplativosti njihove primene. Prvi nivo razmatra urbanističke faktore koji obuhvataju analizu uticaja lokalne klime i predela na pozicioniranje objekta i definisanje preliminaranih formi. Zatim se rade arhitektonska i tehničko-tehnološka rešenja čijom primenom se postiže energetske odgovorno projektovanje, tako što vršimo

materijalizaciju objekata postavljanjem novog materijala na fasade objekata u vidu FN solarnih panela, gde merenjima dobijamo potrebne karakteristike. Druga faza jeste analiziranje ekonomičnosti materijalizacije solarnih panela koja je u direktnoj sprezi sa dužinom veka trajanja FN solarne ćelije kao novog materijala koji postavljamo na fasade objekata. Ova studija sadrži prikaz mogućnosti primene tehnologija koje doprinose energetske efikasnosti objekta. Za dalju razradu potrebno je uraditi precizne proračune i napraviti poseban elaborat, gde bi se uključili i stručnjaci iz drugih oblasti.

Na osnovu gore navedenog, prvo polazimo od odabira nisko-energetskih objekata kao modela za mogućnost primene solarnih panela kao novog materijala, sa ciljem mogućnosti postizanja doprinosa energetske efikasnosti i komfora stanovanja.

4.2. Parametri za projektovanje modela izabranih Objekata-prvi, drugi, treći, četvrti objekat

Nisko-energetski Objekti (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), koji se analiziraju u ovom radu, nalaze se u Beogradu i to na sledećim lokacijama: prvi Objekat u Opštini Rakovica; drugi Objekat u naselju Krnjača, Opština Palilula; treći Objekat u naselju Krnjača, Opština Palilula, četvrti Objekat u Opštini Obrenovac. U pitanju su tipske montažne kuće, nisko-energetske, firme „Kuća Mont“, čija je materijalizacija data u Prilogu 3.

Analiza konteksta prirodne sredine, koja je usko vezana za posmatrane Objekte (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), obuhvata analizu: klime područja, izbora lokacije, konfiguracije terena, orijentacije prema suncu, uticaja vetra, uticaja vegetacije. U tabeli 4.1. date su opšte karakteristike relevantnih nisko-energetskih Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat).

Tabela 4.1. Opšte karakteristike relevantnih nisko-energetskih Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat)

Opšte karakteristike relevantnih nisko-energetskih Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat)				
	prvi Objekat	drugi Objekat	treći Objekat	četvrti Objekat
Opština/naselje	Opština Rakovica	Opština Palilula naselje Krnjača	Opština Palilula naselje Krnjača	Opština Obrenovac
Ulica	miljakovački vinogradi br.39	Save Kovačevića br.29A	Martina Paluške br.3	Milovana Glišića br.14
Katastarska Opština	KO Resnik	KO Krnjača	KO Krnjača	KO Rvati
Katastarska Parcela	3/214	690/1	302	25/41
namena objekta	stambeni	stambeni	stambeni	stambeni
	nisko-energetski objekat	nisko-energetski objekat	nisko-energetski objekat	nisko-energetski objekat

Nakon analiziranih, opštih karakteristika relevantnih, nisko-energetskih Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), posmatraće se karakterizacija istih objekata na osnovu geoprostornih parametara.

4.2.1. Klima Beograda

Da bi ustanovili da li relevantni, nisko-energetski Objekti (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), mogu da zadovolje uslove maksimalno efikasnog rada solarnih panela, potrebno je analizirati odabrane objekte prema geoprostornim parametrima, počevši od sagledavanja klimatskih karakteristika grada Beograda, u kom se nalaze posmatrani nisko-energetski Objekti.

Umereno-kontinentalnu klimu Beograda odlikuju četiri godišnja doba gde je jesen je duža od proleća, sa dužim sunčanim i toplim periodima, dok zima nije tako oštra (u proseku je tokom zime 21 dan sa temperaturom ispod nule). Leto dolazi naglo nakon proleća koje je kratko i kišovito. Najhladniji mesec je januar (prosečna temperatura 0,1°C), dok je najtopliji mesec jul (prosečna temperatura 22,1°C). Najniža temperatura od -26,2°C izmerena je 10. januara 1893. godine, a najviša temperatura od 41,8°C izmerena je 9. septembra 1946. godine, dok je prosečna godišnja temperatura vazduha 11,7°C.

U periodu od skoro 100 godina, od 1888. do 1995. izmereno je samo šest dana sa temperaturom iznad 40°C. Broj „tropskih dana“ kada je temperatura viša od 30°C, u proseku je 31. Interesantno je da broj letnjih dana sa temperaturom višom od 25°C ukupno ima 95 u godini. Karakteristika beogradske klime je jugoistočni i istočni vetar, tj. košava koja donosi vedro i suvo vreme. Košava najčešće duva tokom jeseni i zime, u intervalima od 2 do 3 dana i prosečna brzina ovog vetra je 25-43 km/h, dok u pojedinim udarima može dostići brzinu do 130 km/h. Košava predstavlja jedan od najvećih prečišćivača vazduha u Beogradu.

Što se tiče padavina, na Beograd i okolinu godišnje padne prosečno 669,5 mm padavina. Mesec maj i jun imaju najveću količinu padavina gde prosečni broj kišnih dana iznosi 14. Avgust, septembar i oktobar imaju najmanju količinu padavina. Prosečno trajanje sunčevog sjaja je 2.096 sati dok je najveća insolacija u julu i avgustu (oko 10 časova dnevno). Surotno tome, najveća oblačnost je tokom decembra i januara, kada sunce sija, u proseku 2 do 2,3 sata dnevno. Broj dana sa padanjem snega je u proseku 27, dok je dužina zadržavanja snežnog pokrivača od 30 do 44 dana. Što se tiče srednjeg atmosferskog pritiska, on je u Beogradu 1001 mb, a srednja relativna vlažnost vazduha je 69,5% [<http://www.hidmet.gov.rs/>] [102].

Nakon analiziranih karakteristika klime grada Beograda, na čijoj teritoriji se nalaze relevantni Objekti (prvi, drugi, treći, četvrti objekat) prelazi se na analiziranje geoprostornih karakteristika nisko-energetskih Objekata.

4.2.2. Geoprostorne karakteristike nisko-energetskog Objekta-prvi objekat- Opština Rakovica

Gradska opština Rakovica, je jedna od 17 beogradskih opština, formirana 1974. godine izdvajanjem iz sastava opštine Čukarica. Danas na njenoj teritoriji, izdvojenoj na 18 mesnih zajednica živi više od 100.000 ljudi. Opština Rakovica se prostire na površini od 4.647 hektara, od čega urbanizovano područje obuhvata površinu preko 3.000 hektara. Opština ima povoljan geostrateški položaj zbog blizine glavnih magistralnih pravaca. Znatan deo opštine čine šume i parkovi, a pre svega Miljakovačka šuma i izletište Košutnjak.

Opština Rakovica zauzima površinu od 31 km². Preovladava umereno-kontinentalna klima (nalazi se u središtu severnog umereno toplog pojasa), sa klimom blažom od tipične panonske, kontinentalne. Prosečna godišnja temperatura je oko 11° C, leti oko 22°C, a zimi oko -1°C. Prosek padavina u toku godine je oko 640 L/km². Raspored padavina tokom godine, sa povećanjima tokom proleća, krajem leta i početkom jeseni. Veoma je povoljan za poljoprivrednu proizvodnju. Nadmorska visina iznosi 70m. Broj sunčanih dana je veći od 2.000 časova (podaci Ministarstva energetike).

Prvi Objekat (slika 4.1), se nalazi u Ulici miljkovački vinogradi br.39, KP 3/214 (KP-katastarska parcela), KO Resnik (KO-katastarska opština), Opština Rakovica. Prvi Objekat je izgrađen po svim standardima, potrebnim, za nisko-energetske uslove (Prilog 3).



Slika 4.1. Prvi Objekat, Opština Rakovica

Posmatrani prvi Objekat je izgrađen tako da sleme krova je skoro u pravcu sever-jug, dok su fasade ispod slivnih ravni u pravcu zapad-istok. Prvi Objekat se nalazi na parceli, izolovan od drugih objekata koji bi mogli da prave senku. Spoljašnje uređenje terena, kao i što se vidi na slici 4.1, nema drveća u blizini, što pogoduje realizaciji energetske efikasnosti. Prednost ovako „usamljenog“ objekta je i otvorenost za vetar. Preovlađuju vazдушna strujanja severozapadnog pravca, donoseći padavine. Značajna je i učestalost i jačina severoistočnog vetra, koji je hladan i suv i predstavlja jugozapadni ogranak košave. U svim godišnjim dobima javljaju se i vetrovi južnog i jugozapadnog pravca–zimi suvi i hladni, a u proleće topliji (<http://www.hidmet.gov.rs/>) [102]. Krovne ravni pružaju veće provetravanje objekta uz lokalni dominantni severozapadni vetar, jer se na taj način leti omogućava prirodno provetravanje unutrašnjeg prostora, a samim tim se manje koristi veštačka ventilacija.

4.2.3. Geoprostorne karakteristike nisko-energetskih Objekata-drugi i treći objekat-naselje Krnjača, Opština Palilula

Nisko-energetski, drugi Objekat, nalazi se u gradskom naselju Krnjača. Krnjača je Beogradsko naselje u opštini Palilula, na levoj obali reke Dunav, na nadmorskoj visini od 71

do 80 m. Naselje je izgrađeno iza dugog nasipa duž Dunava, ali se i dalje često dešava da bude poplavljeno. Krnjača je dosta razbacano naselje i proteže se duž dve glavne saobraćajnice u ovoj oblasti, pančevačkog puta koji povezuje Pančevo i Beograd i zrenjaninskog puta koji povezuje Beograd i Zrenjanin. „Starim Beogradom“ je povezana pančevačkim mostom.

Postojeće stanovanje i stambeno tkivo zastupljeno je u severoistočnom delu obuhvata Plana detaljne regulacije, na delu između Pančevačkog puta, Kanala „Kalovita“ i odbrambenog nasipa, ukupne površine od oko 20.54ha. Površine kompleksa u ovoj zoni se kreću od 0.1ha do 1.2ha, prosečne veličine parcela od oko 0.20ha. U okviru ove zone se nalazi veći broj objekata stambene i stambeno-poslovne namene, kao i određeni broj ugostiteljskih objekata. Prema podacima RGZ-a zemljište je pretežno u privatnoj svojini, kao i sa statusom prava korišćenja. Većina objekata je izgrađena u okviru pripadajuće katastarske parcele. Objekti su uglavnom povučeni od regulacione linije, sa prednjim i zadnjim dvorištem, slobodnostojeći, sa podstandardnim bočnim rastojanjem između objekata. Prema tipologiji, evidentirano je više oblika stambenih objekata i to: porodične kuće, tipična seoska domaćinstva, kuće za odmor (vikendice), privremeni i neadekvatni stambeni objekti i sl. U nekim od objekata se u prizemlju nalaze poslovni i ugostiteljski sadržaji. Objekti su relativno dobrog boniteta, spratnosti P - P+1+Pk. Nagib krovnih ravni je 45° maksimalno. Pristup objektima je sa saobraćajnice Pančevački put, indirektno preko servisnih saobraćajnica, kao i preko postojećih kolsko-pešačkih staza između saobraćajnice i odbrambenog nasipa i Kanala „Kalovita“. Prosečan indeks izgrađenosti na parceli je oko „i“=0.2 (od 0.09 do 0,3), a prosečan indeks zauzetosti „z“=0.1 (od 0.05 do 0.2).

Drugi Objekat (slika 4.2), kao i treći Objekat (slika 4.3) su izgrađeni po svim standardima, potrebnim, za nisko-energetske uslove (Prilog 3). Drugi Objekat se nalazi u Ulici Save Kovačevića br.29A, KP 690/1 (KP-katastarska parcela), KO Krnjača (KO-katastarska opština), Opština Palilula. Treći Objekat se nalazi u Ulici Martina Paluške br.3, KP 302, KO Krnjača, Opština Palilula.



Slika 4.2. Drugi Objekat, gradsko naselje Krnjača, opština Palilula



Slika 4.3. Treći Objekat, gradsko naselje Krnjača, opština Palilula

Posmatrani drugi i treći Objekat su izgrađeni tako da sleme krova je skoro u pravcu severo-zapad jugo-istok za drugi Objekat, odnosno u pravcu severo-istok jugo-zapad za treći Objekat, dok su fasade ispod slivnih ravni u pravcu zapad-istok. Drugi i treći Objekat se nalaze na parcelama, izolovani od drugih objekata koji bi mogli da prave senku. Spoljašnje uređenje terena, kao i što se vidi na slici 4.2 i 4.3, nema drveća u blizini, koje bi mogle da svojom senkom smanje karakteristike energetske efikasnosti. Prednost ovako „usamljenog“ objekta je i otvorenost za vetar. Preovlađuju vazдушna strujanja severozapadnog pravca, donoseći padavine. Značajna je i učestalost i jačina severoistočnog vetra, koji je hladan i suv i predstavlja jugozapadni ogranak košave. U svim godišnjim dobima javljaju se i vetrovi južnog i jugozapadnog pravca – zimi suvi i hladni, a u proleće topliji (<http://www.hidmet.gov.rs/>) [102]. Krovne ravni pružaju veću aerodinamičnost objektima u odnosu na lokalni dominantni severozapadni vetar, jer se na taj način leti omogućava prirodno provetravanje unutrašnjeg prostora, a samim tim se manje koristi veštačka ventilacija. Solarni uticaj, zelenilo i vetar su činioci koji dosta utiču na potrošnju energije objekta i samo pravilnim iskorišćavanjem njihovih potencijala postiže se njihova energetska efikasnost.

4.2.4. Geoprostorne karakteristike nisko-energetskog Objekta 4-četvrti objekat, Opština Obrenovac

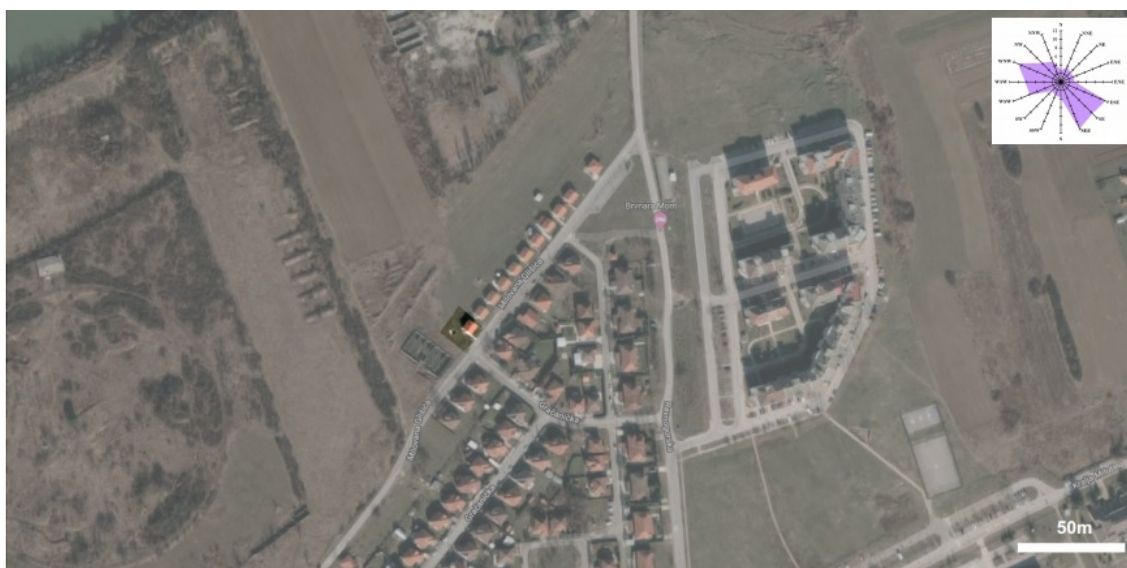
Raznovrsnost geografskog položaja opštine Obrenovac sadržana je u činjenici da se ona u regionalnoj podeli nalazi na kontaktu panonske i peripanonske Srbije. Ako se za granicu između nizije i oboda panonskog basena uzmu prirodne granice tj., Sava i Dunav, onda teritorija opštine Obrenovac pripada peripanonskoj Srbiji.

Prostor opštine Obrenovac odlikuje se uglavnom umereno-kontinentalnom klimom, koja se karakteriše toplim letima i hladnim zimama. Zbog potpune otvorenosti prema severu i severozapadu i nepostojanja izrazitijih orografskih prepreka, teritorija opštine Obrenovac se često nalazi pod uticajem hladnih vazдушnih masa koje preko severne i srednje Evrope lako prodiru na jug. Severozapadno od Obrenovca, na razdaljini od oko 60

km vazdušne linije, nalazi se Fruška gora (538 m), jedina orografska prereka ovim vazdušnim strujama. Na vremenske prilike ove teritorije snažno uticu cikloni koji dolaze iz Đenovskog zaliva, kreću se dolinom Save i dalje, dolinom Dunava odlaze prema Crnom moru. Doline Drine i Kolubare (orotopografski sklop terena) imaju veoma bitnu ulogu u orijentaciji vazdušnih strujanja za ovaj deo Srbije.

Najzanimljiviji i najvažniji klimatski elemenat je vetar i nalazi se u direktnoj zavisnosti od cirkulacije u atmosferi i orografije. U Obrenovcu, vetar najčešće duva iz jugoistočnog kvadranta (svaki treći dan) i ima najveću prosečnu brzinu. Godišnji broj dana sa jakim vetrom (jačine 6 bofora i više) u proseku iznosi 124, sa maksimumom u martu (15 dana) i minimumom u avgustu (sedam dana), (<http://www.hidmet.gov.rs/>) [102].

Četvrti Objekat (slika 4.4) se nalazi u Ulici Milovana Glišića br.14, KP 25/41, KO Rvati, Opština Obrenovac.



Slika 4.4. Četvrti Objekat, Opština Obrenovac

Posmatrani četvrti Objekat je izgrađen tako da sleme krova je u pravcu sever-istok jugo-zapad, dok su fasade ispod slivnih ravni u pravcu severo-zapad jugo-istok. Četvrti Objekat se nalazi na parceli, u nizu montažnih nisko-energetskih kuća izolovan sa tri strane od drugih objekata koji bi mogli da prave senku, dok severo-istočna fasada gleda na montažnu kuću u nizu. To ne predstavlja problem, jer FN fotonaponske panele postavljamo na fasade ispod slivnih ravni krova, koji je pod uglom od 40°. Spoljašnje uređenje terena, kao i što se vidi na slici 4.4, nema drveća u blizini, što pogoduje realizaciji energetske efikasnosti. Prednost ovako „usamljenog“ objekta je i otvorenost za vetar. Preovlađuju vazdušna strujanja severozapadnog pravca, donoseći padavine. Značajna je i učestalost i jačina severoistočnog vetra, koji je hladan i suv i predstavlja jugozapadni ogranak košave. U svim godišnjim dobima javljaju se i vetrovi južnog i jugozapadnog pravca—zimi suvi i hladni, a u proleće topliji (<http://www.hidmet.gov.rs/>) [102]. Krovne ravni pružaju veće provetravanje objekta uz lokalni dominantni severozapadni vetar, jer se na taj način leti omogućava prirodno provetravanje unutrašnjeg prostora, a samim tim se manje koristi veštačka ventilacija.

Nakon izloženih geoprостornih karakteristika relevantnih, nisko-energetskih Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), za mogućnost efikasne primene solarnih panela potrebno je sagledati i karakteristike bioklimatske arhitekture istih, posmatranih objekata.

4.2.5. Analiza geoprостornih karakteristika nisko-energetskih Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat) u odnosu na parametre bioklimatske arhitekture

Prema parametrima bioklimatske arhitekture (prikazanim u Poglavlju 2.), Objekti: prvi, drugi, treći, četvrti su projektovani da u određenoj meri koriste postojeće prirodne elemente i stoga troše manju količinu energije za grejanje i klimatizaciju. U tabeli 4.2. data je analiza geoprостornih karakteristika posmatranih Objekata u odnosu na parametre bioklimatske arhitekture.

Tabela 4.2. Analiza geoprостornih karakteristika Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat) u odnosu na parametre bioklimatske arhitekture

Geoprостorne karakteristike Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat)	Parametri bioklimatske arhitekture – kriterijumi			
	konfiguracija terena (iskorišćenost nagiba terena)	orijentacija (osunčavanje)	uticaj vetra (prirodna ventilacija)	uticaj vegetacije (zasenčenje)
Prvi Objekat	objekat se nalazi u ravnici, otvoren uticajima vetra	sleme krova u pravcu sever-jug omogućava veću izloženost suncu i povećanje temperature zimi, kao i stvaranju prijatnije mikroklimе	dinamičan severozapadni i jugozapadni (ogranak košave) vetar, omogućava se provetravanje objekta leti i povećava aerodinamičnost i prirodnu ventilaciju koja smanjuje energetske troškove	izolovan od drugih objekata, nema drveća koji bi mogli da prave senku
Drugi Objekat	objekat se nalazi u ravnici, otvoren uticajima vetra	sleme krova u pravcu sever-istok omogućava veću izloženost suncu i povećanje temperature zimi, kao i stvaranju prijatnije mikroklimе	dinamičan severozapadni i jugozapadni (ogranak košave) vetar, omogućava se provetravanje objekta leti i povećava aerodinamičnost i prirodnu ventilaciju koja smanjuje energetske troškove	izolovan od drugih objekata, nema drveća koji bi mogli da prave senku
Treći Objekat	objekat se nalazi u ravnici, otvoren uticajima vetra	sleme krova u pravcu sever-istok omogućava veću izloženost suncu i povećanje temperature zimi, kao i stvaranju prijatnije mikroklimе	dinamičan severozapadni i jugozapadni (ogranak košave) vetar, omogućava se provetravanje objekta leti i povećava aerodinamičnost i prirodnu ventilaciju koja smanjuje energetske troškove	izolovan od drugih objekata, nema drveća koji bi mogli da prave senku
Četvrti Objekat	objekat se nalazi u ravnici, otvoren uticajima vetra	sleme krova u pravcu sever-istok omogućava veću izloženost suncu i povećanje temperature zimi, kao i stvaranju prijatnije mikroklimе	dinamičan severozapadni i jugozapadni (ogranak košave) vetar, omogućava se	nema vegetacije, planiranim rastojanjem od objekta smanjuje se uticaj vetra, leti snižava temperatura i pravi

		prijatnije mikroklima	provetravanje objekta leti i povećava aerodinamičnost i prirodnu ventilaciju koja smanjuje energetske troškove	prirodno zasenčenje.
--	--	-----------------------	--	----------------------

Na osnovu prethodne analize može se zaključiti sledeće. Posmatrani Objekti (prvi, drugi, treći, četvrti objekat) na osnovu konfiguracije terena, se nalaze u ravnici i izloženi su uticajima vetra. Sleme krova prvog Objekta je orijentisano u pravcu sever-jug, dok je sleme krova drugog, trećeg i četvrtog Objekta orijentisano u pravcu sever-istok. Na taj način su u većoj meri izloženi suncu i povećanju temperature u zimskom periodu, što bi omogućilo i prijatniju mikroklimu. Vetrovi koji duvaju, a karakteristični su za šire područje grada Beograda su Košava i ogranci Košave, što omogućava provetravanje objekta leti i povećava se aerodinamičnost i prirodna ventilacija koja smanjuje energetske troškove. Velika prednost analiziranih objekata je i njihov položaj u odnosu na druge objekte, rastinje, zelenilo. Odnosno, nema vegetacije, planiranim rastojanjem od objekta smanjuje se uticaj vetra, leti snižava temperatura i pravi prirodno zasenčenje.

Zaključujemo da su dobijene potrebne geoprostorne karakteristike relevantnih, nisko-energetskih Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), koji u većoj meri zadovoljavaju uslove za efikasnu primenu solarnih panela na istim. Međutim, kako se preko prozora i spoljašnjih zidova gubi veliki procenat toplote, potrebno je izvršiti energetska optimizaciju analiziranih Objekata što će biti urađeno u narednom podpoglavlju.

4.2.6. Opis energetske optimizacije nisko-energetskih Objekata-prvi, drugi, treći, četvrti objekat

Na osnovu detaljnog opisa nisko-energetskih Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), pretpostavka je da zadovoljavaju prva tri od četiri parametra potrebnih kako bi objekti bili energetski efikasni, što se vidi u Prilogu 3. Ti parametri su:

- 1) Omotač zgrade (zidovi, krov, podovi) – dobra izolovanost omotača, poboljšanje zaptivenosti i izbegavanje termičkih mostova, racionalizovano osvetljenje;
- 2) Karakteristike upotrebljenih materijala (sklopovi i slojevi, kvalitet i zaptivenost prozora i štoka i dr.);
- 3) Tehnološki sistemi za hlađenje, grejanje i ventilaciju – poboljšanje komfora i energetski efikasni sistemi;
- 4) Primena OIE i odgovarajućih pasivnih/aktivnih solarnih sistema.

Da bi se ispunio i četvrti uslov energetske efikasnosti za nisko-energetske Objekte (prvi, drugi, treći, četvrti objekat) izvršiće se prikaz metode materijalizacije fasada ovih objekata. Simulacijom FN monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela, odabranog elementa materijalizacije prve generacije FN tehnologije postavljenih na fasade navedenih objekata, a zatim simulacijom FN kadijum telurida (CdTe) i FN bakar indijum diselenida (CIS), druge generacije FN tehnologije, integrisanih na jednom modelu-Objekat 1, ukazaće se na funkcionalne i energetske potencijale, kako bi se podstakla primena FN solarnih sistema u domaćim uslovima.

Na slici 4.5 su prikazani nisko-energetski Objekti (prvi, drugi, treći, četvrti objekat) na čijim fasadama, su simulacijom, postavljeni FN solarni paneli.



Prvi Objekat



Drugi Objekat



Treći Objekat



Četvrti Objekat 4

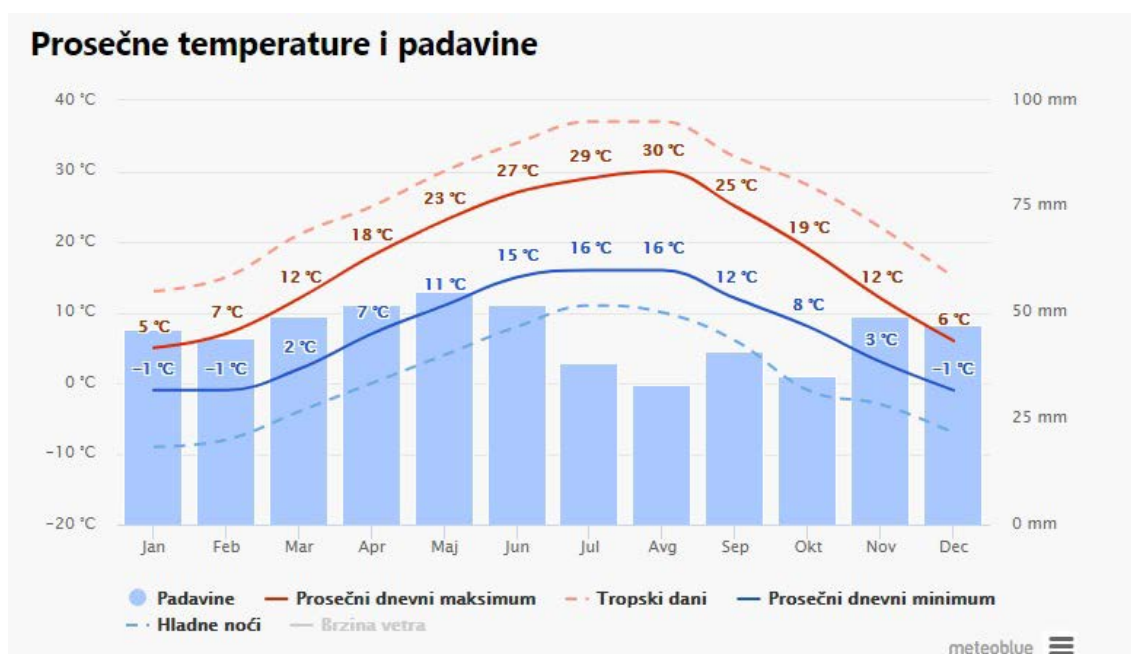
Slika 4.5. Simulacija FN solarnih panela na fasade Objekata-prvi, drugi, treći, četvrti objekat (objekti su poređani redom od dozgo na dole: Prvi Objekat, drugi Objekat, treći Objekat, Četvrti Objekat (Prilog 3).

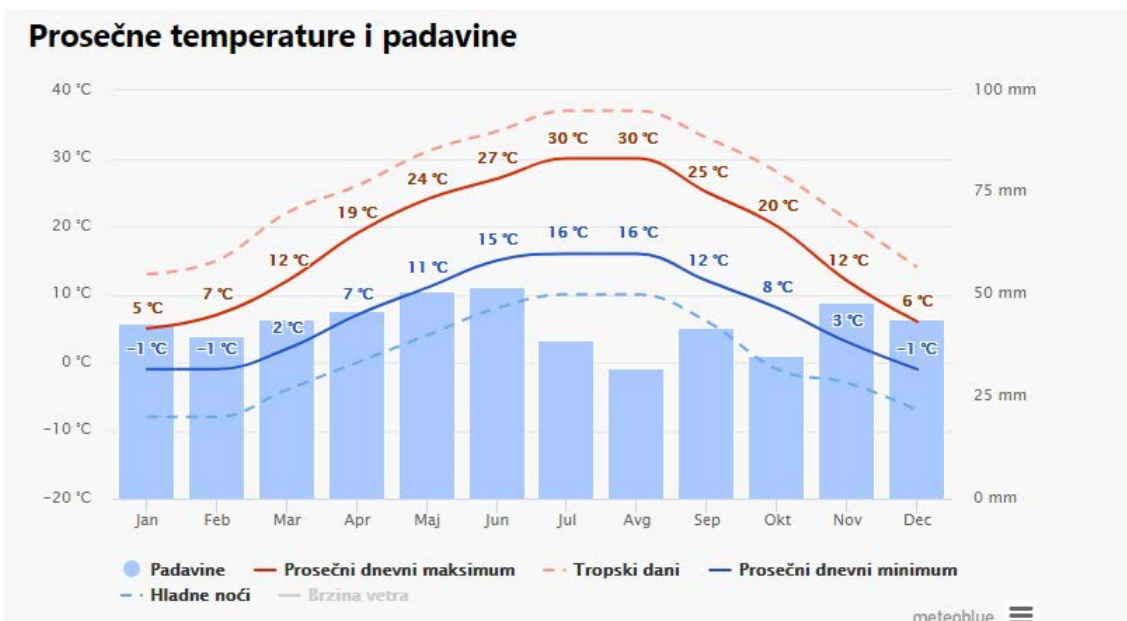
Na osnovu istraživanja, zaključak bi bio sledeći. Nisko-energetski Objekti (prvi, drugi, treći, četvrti objekat) zadovoljavaju prva tri od četiri parametra potrebnih kako bi objekti bili energetski efikasni. Četvrti se odnosi na primenu OIE i odgovarajućih pasivnih/aktivnih solarnih sistema. Da bi se ispunio i četvrti uslov energetske efikasnosti za nisko-energetske Objekte (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), izvršice se prikaz metode materijalizacije fasada ovih objekata, monokristalnim silicijumskim (sc-Si) solarnim panelima, odabranog elementa materijalizacije prve generacije FN tehnologije, postavljenim na fasade navedenih objekata.

4.3. Određivanje snage FN monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela na fasadama nisko-energetskih Objekata-prvi, drugi, treći, četvrti objekat

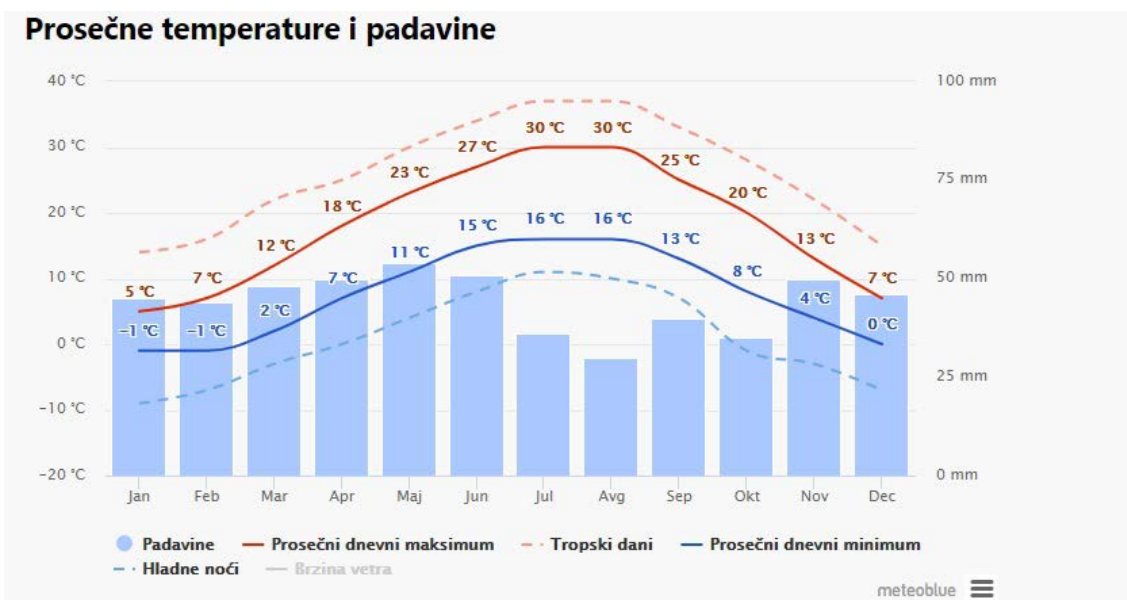
Parametri, potrebni za proračun snage FN solarnih panela postavljenih na fasade nisko-energetskih Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat) su sledeći [103]:

- 1) Za prvi Objekat, opština Rakovica: prosečne temperature i padavine (slika 4.6), maksimalne temperature (slika 4.7), broj sunčanih, poluoblačnih, oblačnih i kišnih dana (slika 4.8), ruža vetrova (slika 4.9), brzina vetra (slika 4.10);
- 2) Za drugi i treći Objekat, naselje Krnjača: prosečne temperature i padavine (slika 4.6), maksimalne temperature (slika 4.7), broj sunčanih, poluoblačnih, oblačnih i kišnih dana (slika 4.8), ruža vetrova (slika 4.9), brzina vetra (slika 4.10);
- 3) Za četvrti Objekat, opština Obrenovac: prosečne temperature i padavine (slika 4.6), maksimalne temperature (slika 4.7), broj sunčanih, poluoblačnih, oblačnih i kišnihdana (slika 4.8), ruža vetrova (slika 4.9), brzina vetra (slika 4.10).





Naselje Krnjača

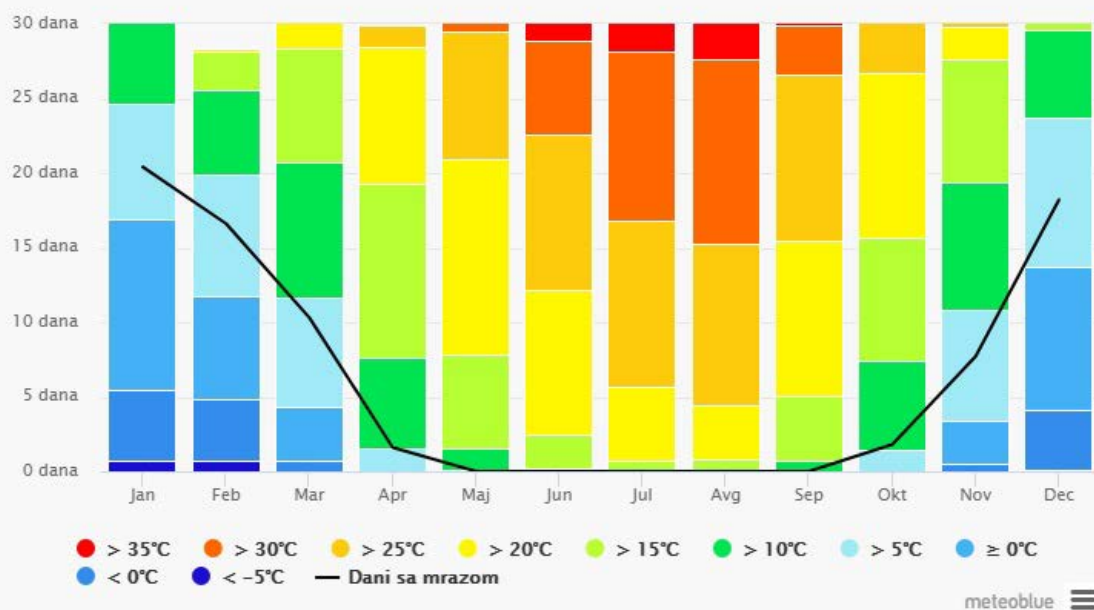


Opština Obrenovac

Slika 4.6. Prosečne temperature i padavine: u opštini Rakovica, naselju Krnjača, opštini Obrenovac
(<https://www.meteoblue.com/sr/>) [103]

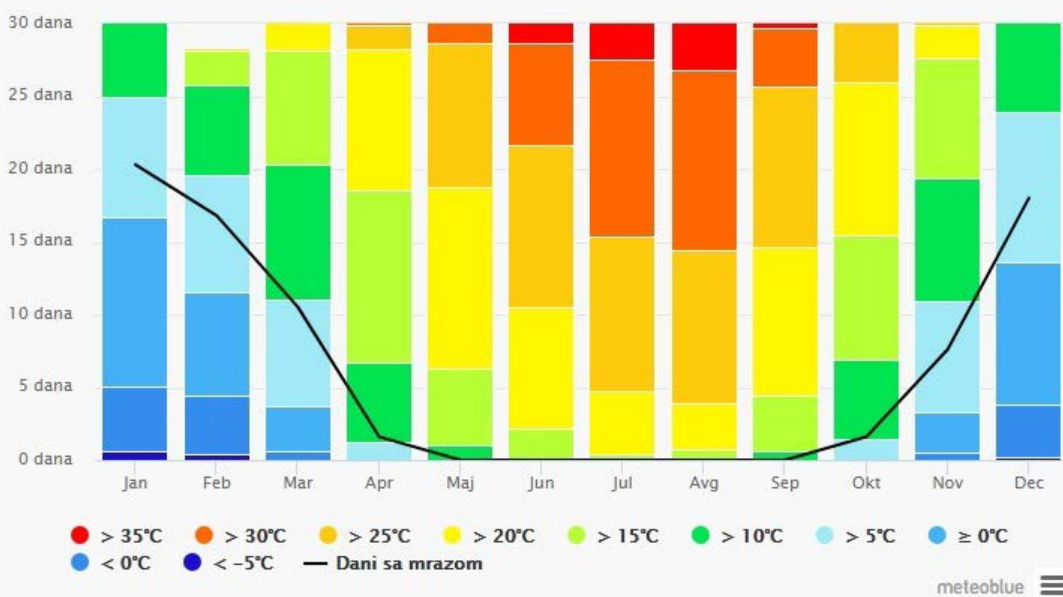
Na slici 4.6, „Prosečni dnevni maksimum” (puna crvena linija) prikazuje prosečnu dnevnu vrednost svakog meseca za opštinu Rakovica, naselje Krnjača, opštinu Obrenovac. Isto tako, „prosečni dnevni minimum” (puna plava linija) prikazuje prosečnu dnevnu minimalnu temperaturu. Tropski dani ili ledene noći (isprekidana crvena i plava linija) prikazuju srednju vrednost najtoplijeg dana i najhladnije noći svakog meseca u poslednjih 30 godina. Mesečne vrednosti padavina preko 150mm su uglavnom kišovite, a ispod 30mm uglavnom suve.

Maksimalne temperature

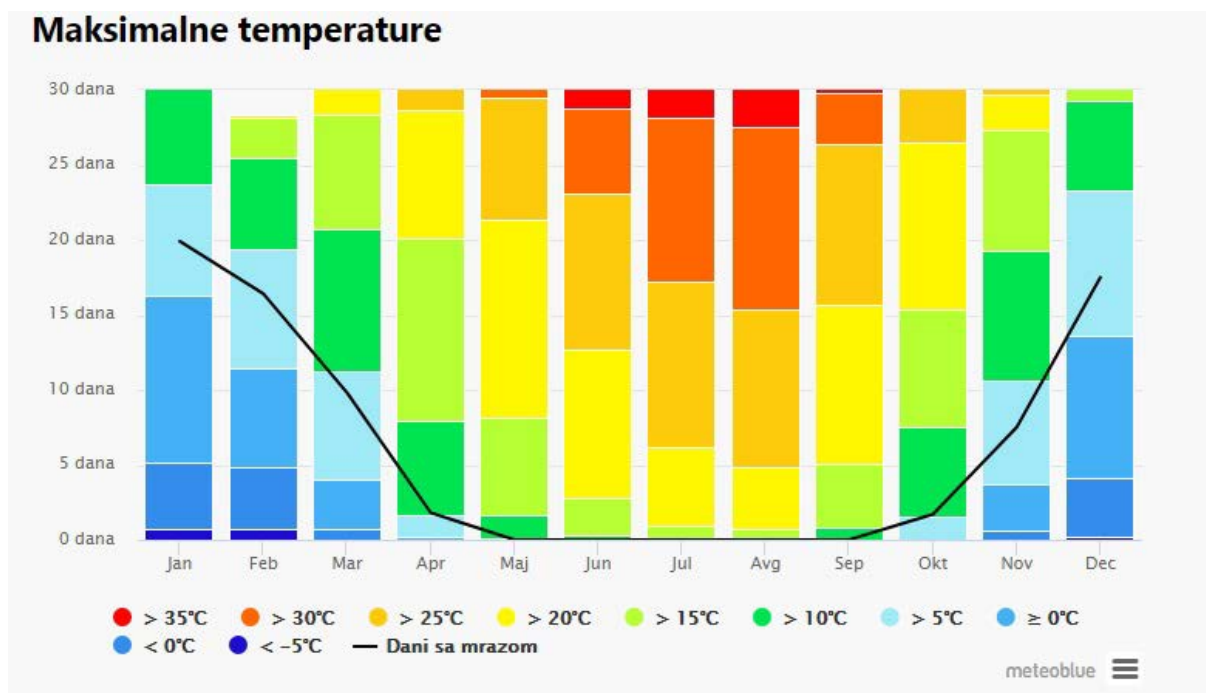


Opština Rakovica

Maksimalne temperature



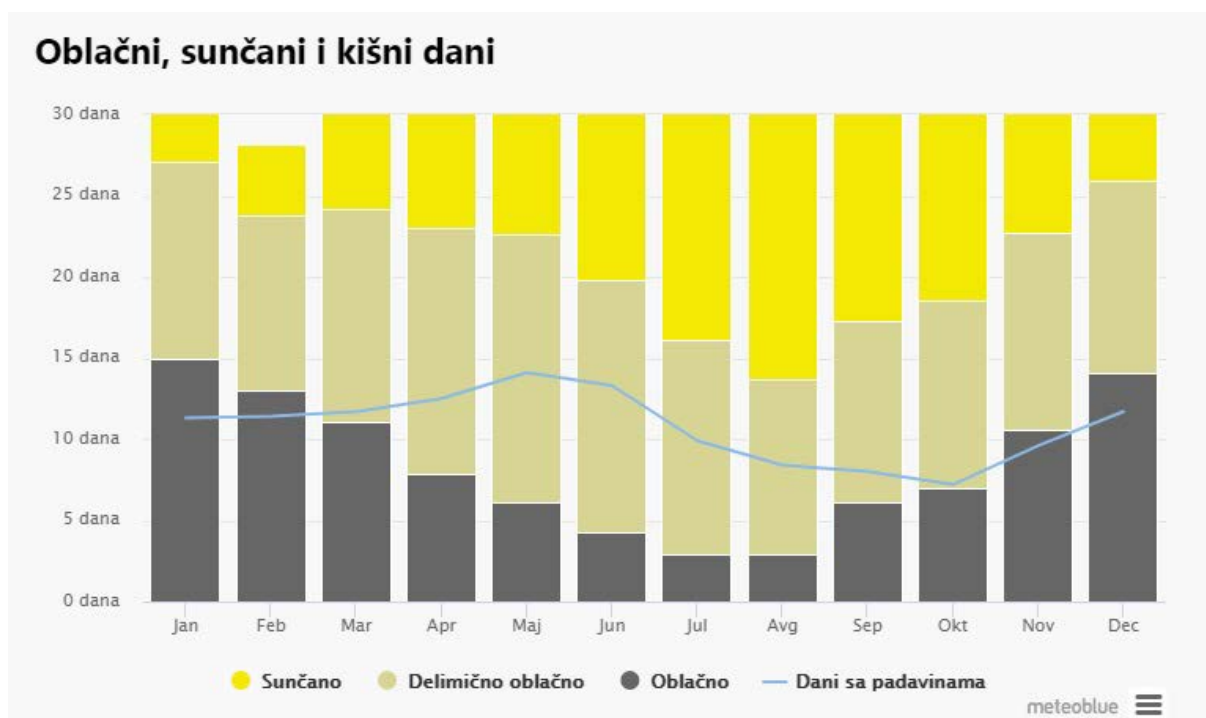
Naselje Krnjača



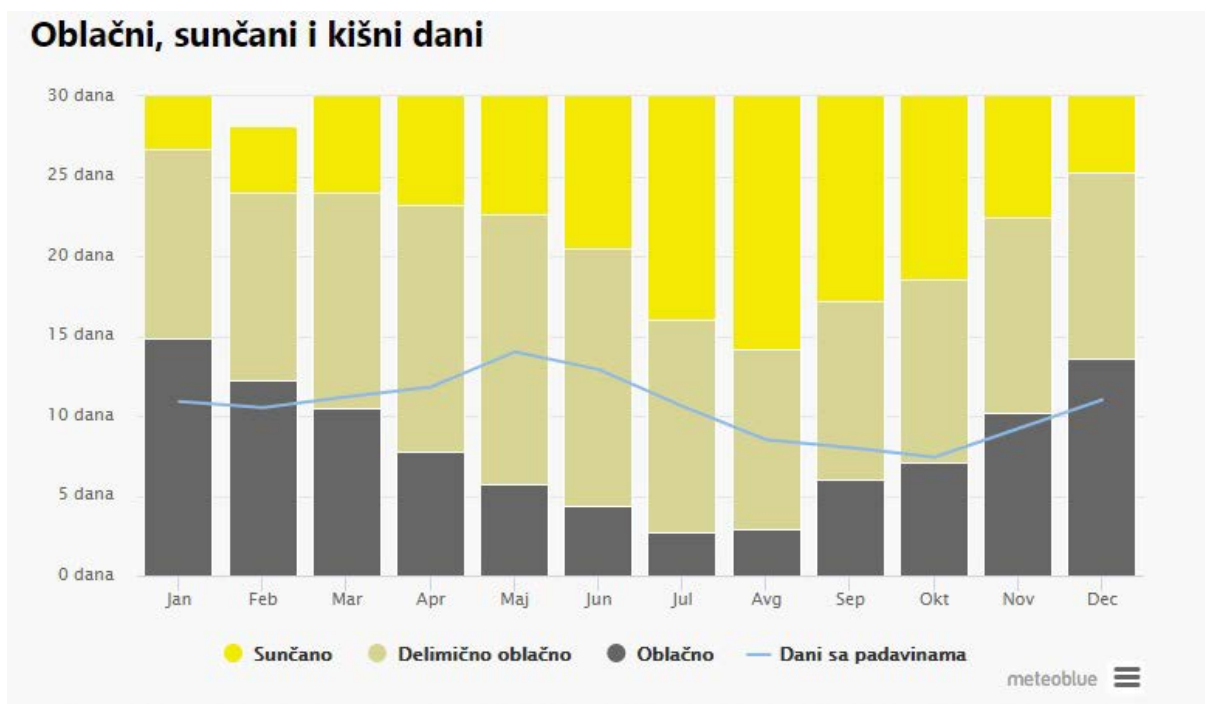
Opština Obrenovac

Slika 4.7. Maksimalne temperature: u opštini Rakovica, naselju Krnjača, u opštini Obrenovac
(<https://www.meteoblue.com/sr/>)[103]

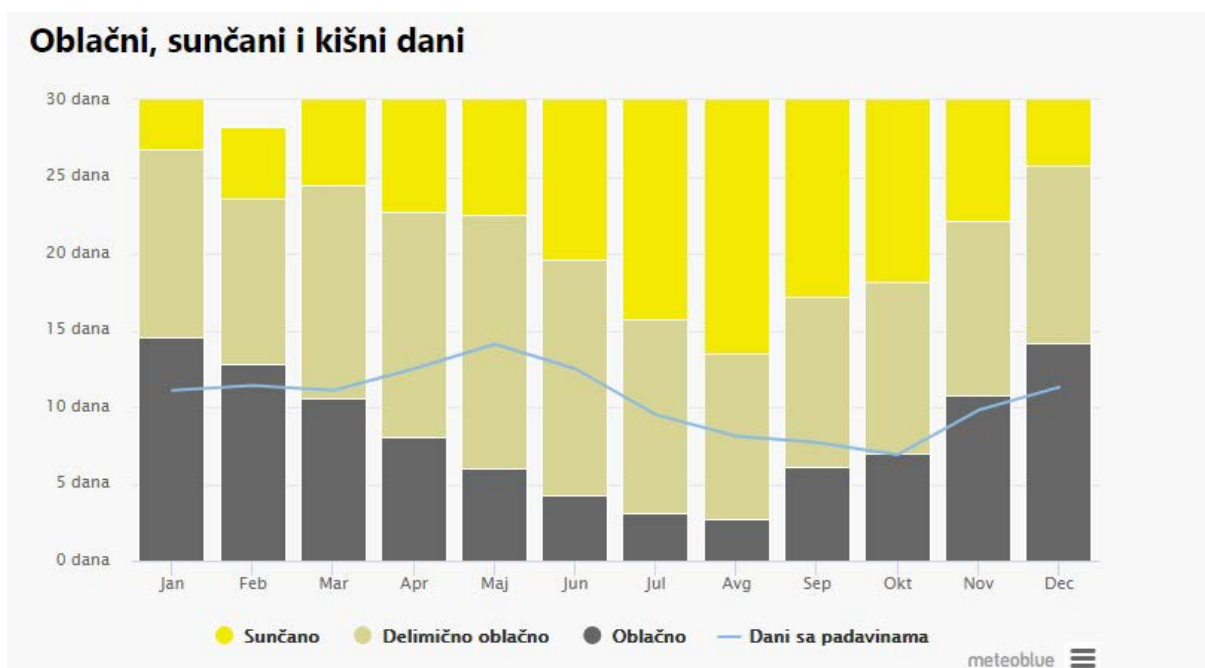
Slika 4.7 prikazuje dijagram maksimalne temperature za opštinu Rakovica, naselje Krnjača, opštinu Obrenovac, odnosno koliko dana u mesecu dostigne određene temperature.



Opština Rakovica



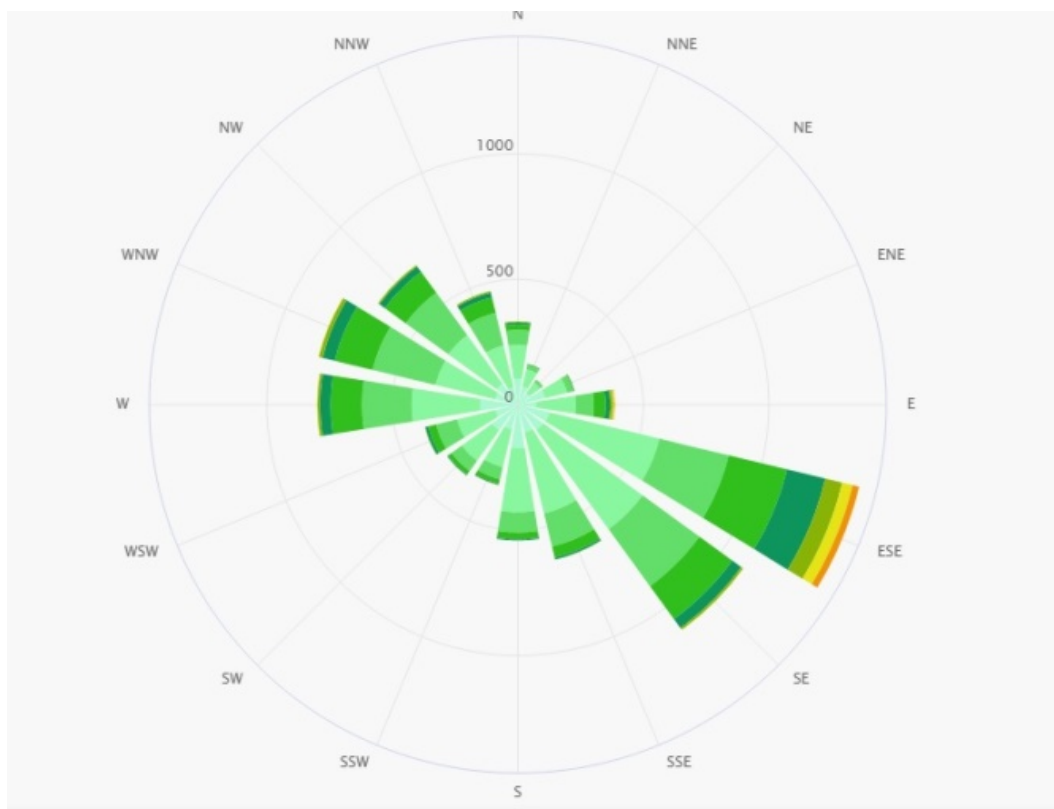
Naselje Krnjača



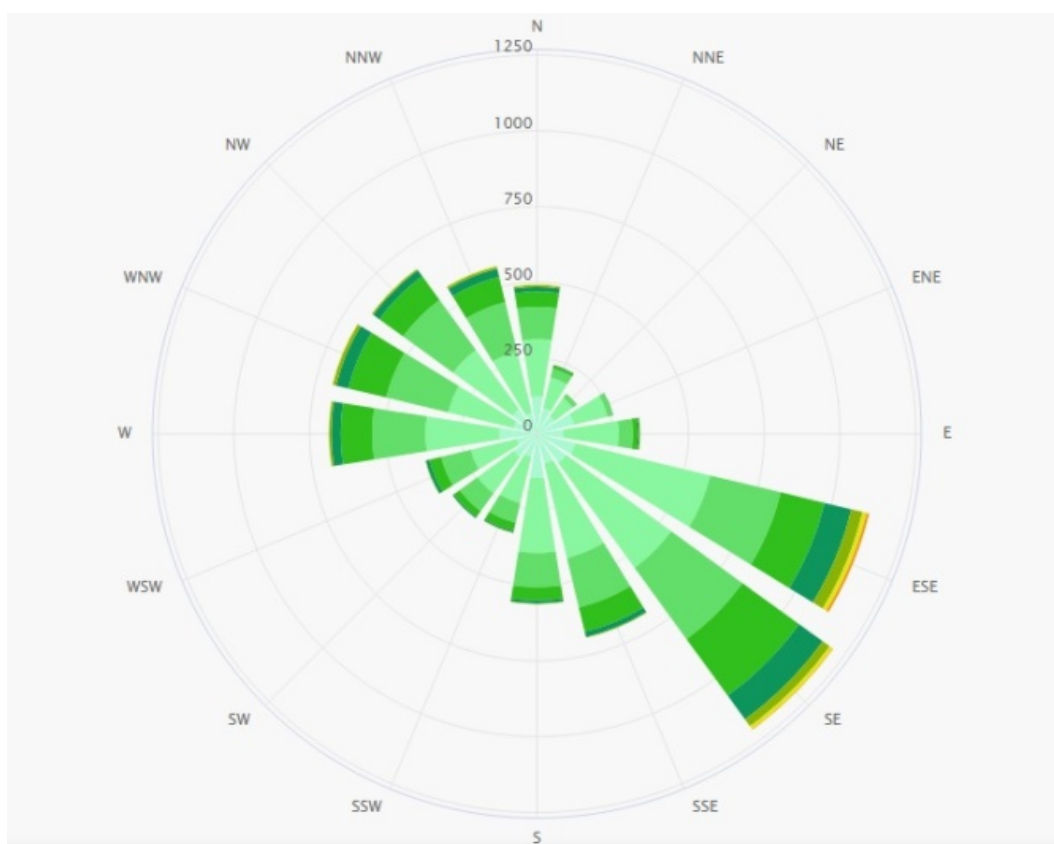
Opština Obrenovac

Slika 4.8. Mesečne vrednosti sunčanih, poluoblačnih, oblačnih i kišnih dana u opštini Rakovica naselju Krnjača, u opštini Obrenovac (<https://www.meteoblue.com/sr/>)[103]

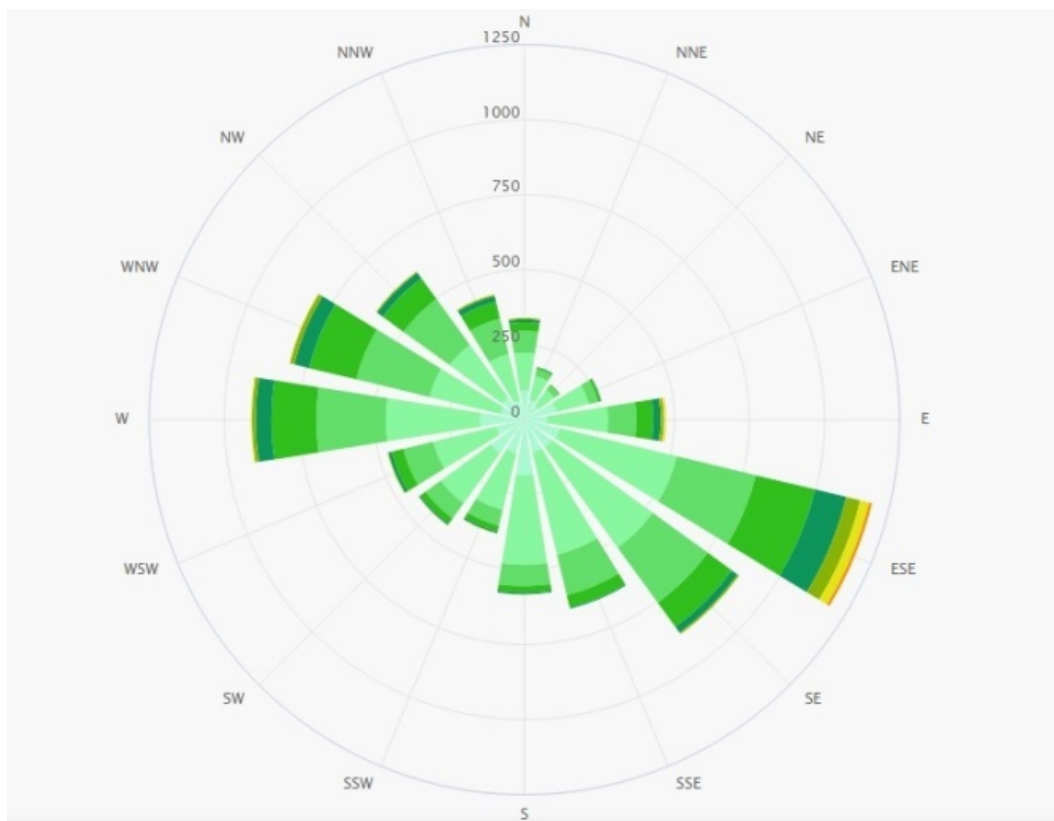
Slika 4.8 prikazuje dijagram mesečne vrednosti sunčanih, delimično oblačnih, oblačnih i kišnih dana. Dani sa pokrivenošću oblaka manjom od 20% se smatraju sunčanim, od 20-80% kao delimično oblačni, a sa pokrivenošću većom od 80% kao oblačni.



Opština Rakovica



Naselje Krnjača

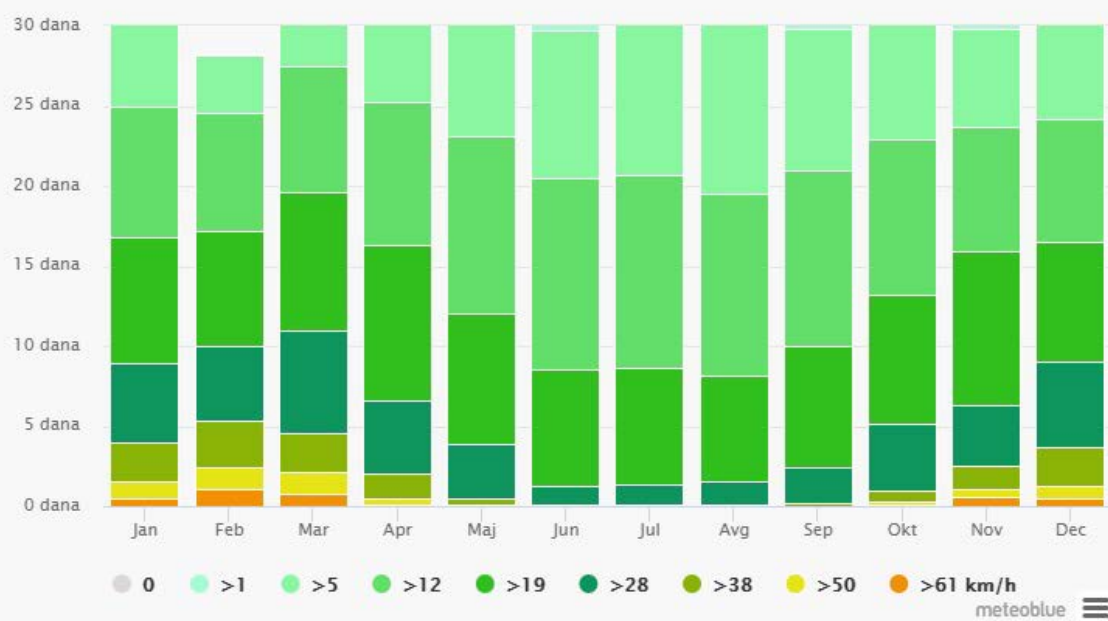


Opština Obrenovac

*Slika 4.9. Ruža vetrova u opštini Rakovica, naselju Krnjača, opštini Obrenovac
(<https://www.meteoblue.com/sr/>)[103]*

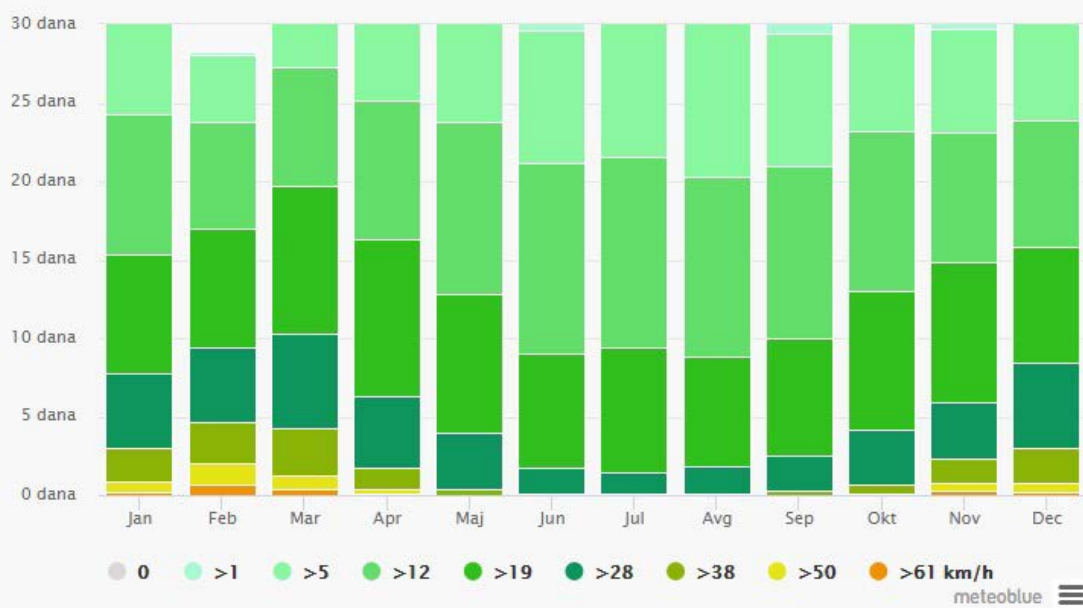
Ruža vetrova, za opštinu Rakovica, naselje Krnjača, opštinu Obrenovac, prikazuje koliko sati u godini vetar duva iz pojedinih pravaca (slika 4.9). Na primer: Vetar duva iz pravca Jugo-Zapada (JZ) ka Severo-Istoku (SI).

Brzina vetra

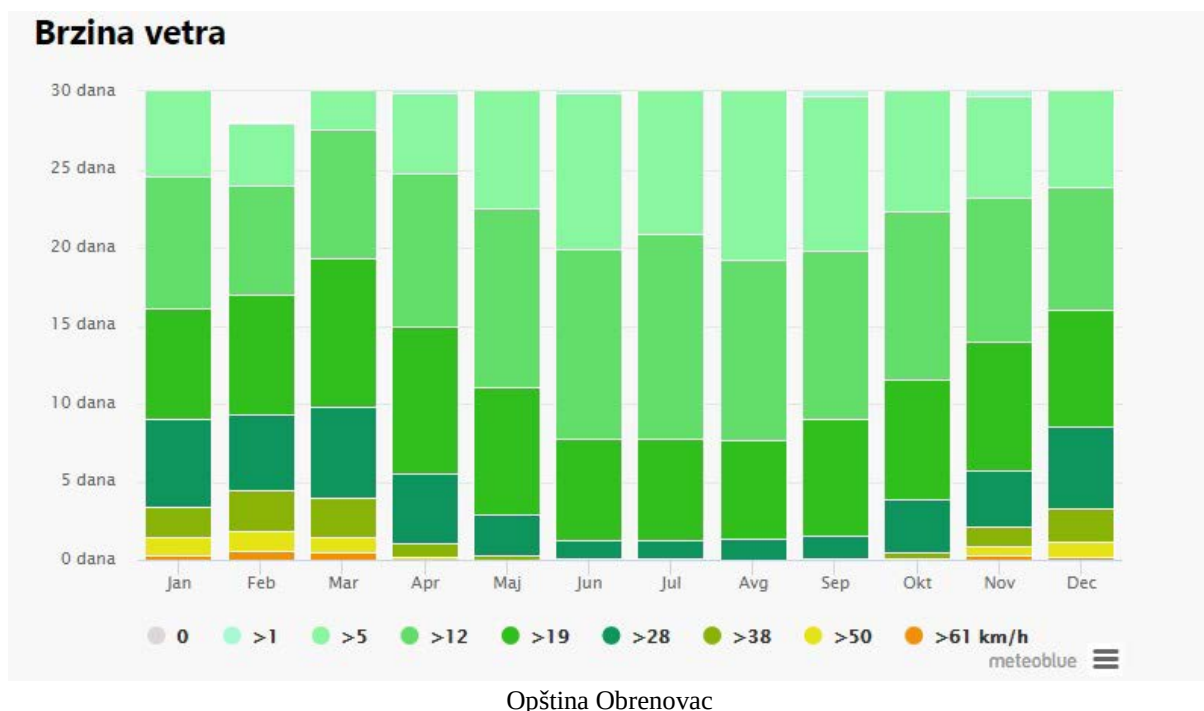


Opština Rakovica

Brzina vetra



Naselje Krnjača



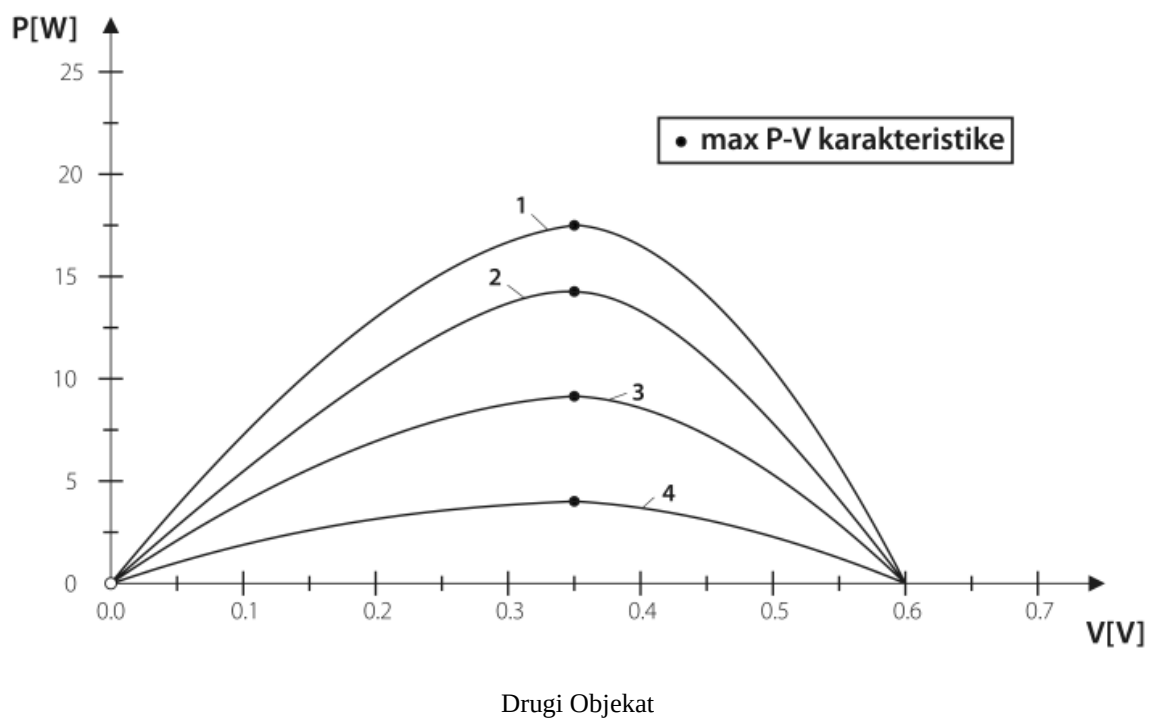
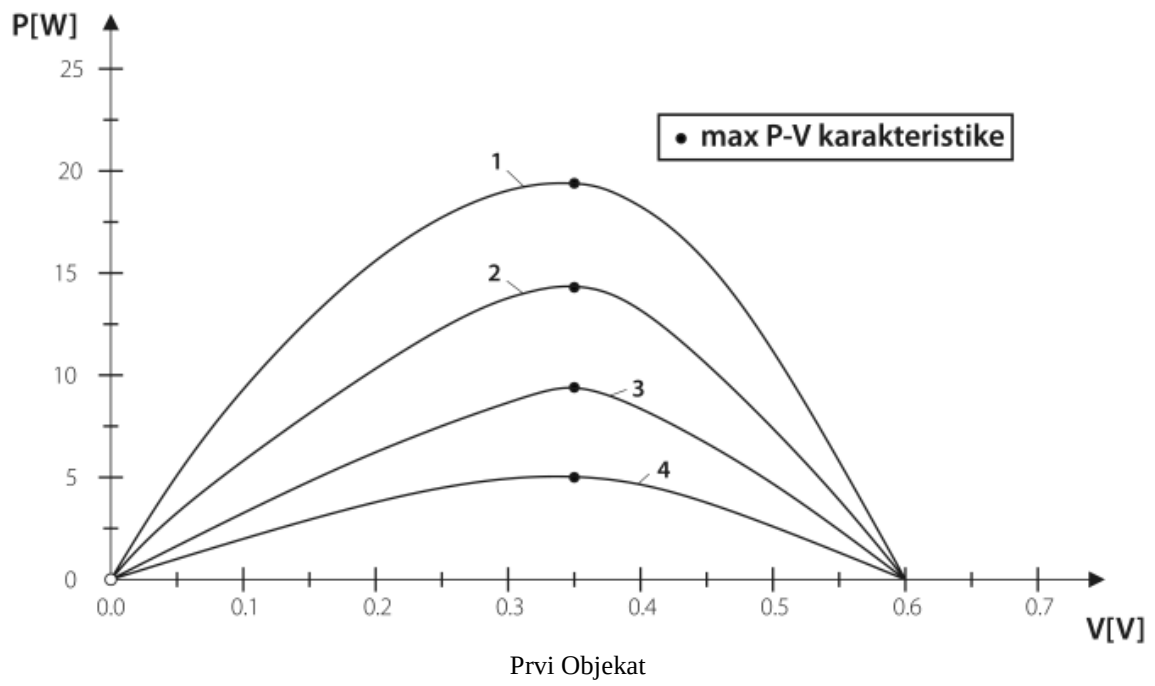
Slika 4.10. Brzina vetra u opštini Rakovica, naselju Krnjača, opštini Obrenovac
(<https://www.meteoblue.com/sr/>)[103]

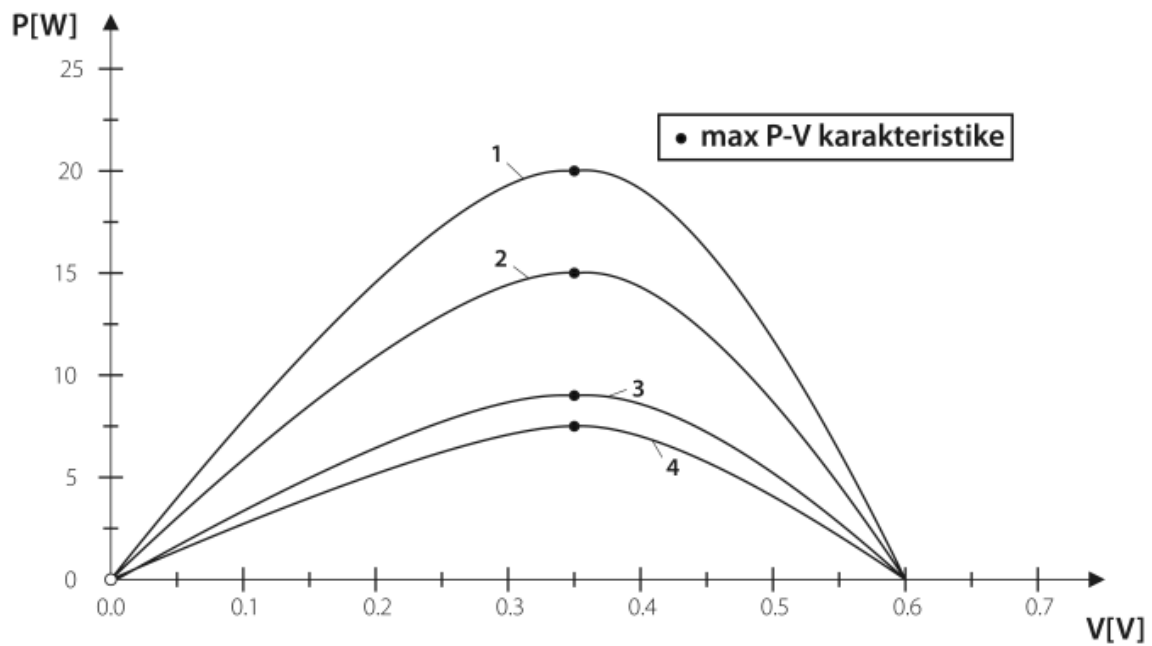
Na slici 4.10 prikazuje se koliko dana u toku jednog meseca je moguće očekivati da će određene brzine vetra biti dostignute, za opštinu Rakovica, naselje Krnjača, opštinu Obrenovac.

Na osnovu analiziranih parametara, potrebnih za proračun snage FN solarnih panela postavljenih na fasade nisko-energetskih Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat) prelazi se na sledeći korak, a to je merenje snimljene snage monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela postavljenih na fasade odabranih objekata.

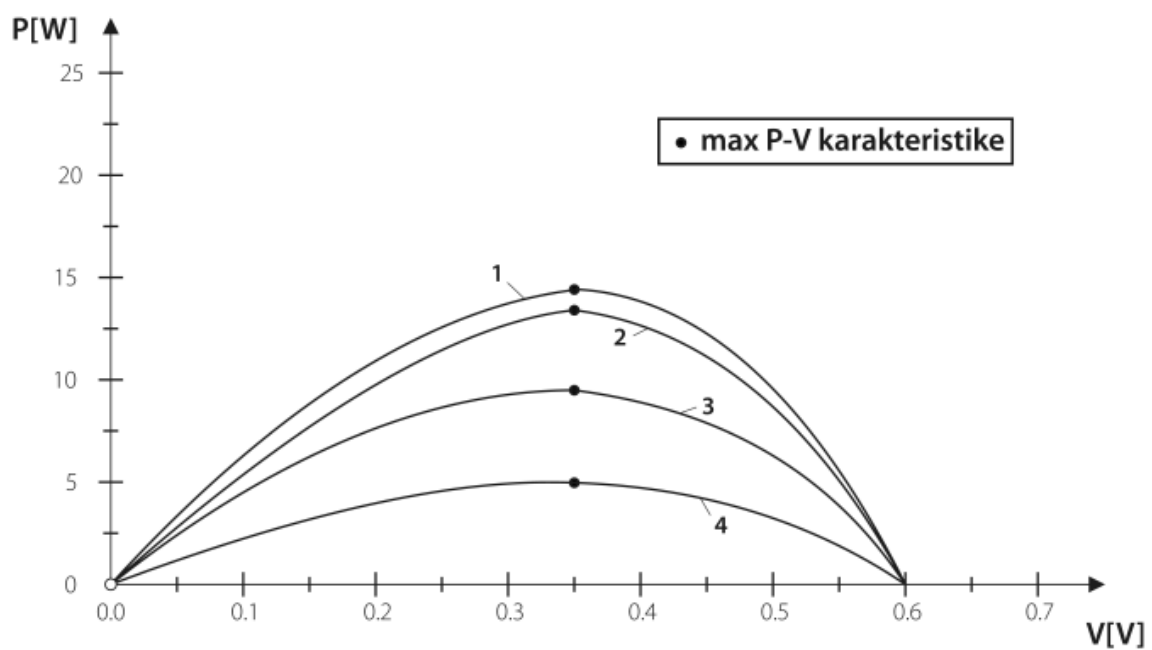
4.3.1. Snaga FN monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela postavljenih na krovove Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat) za sezonu 2017/18.

Na Objektima (prvi, drugi, treći, četvrti objekat) su simulacijom postavljeni FN solarni paneli na krov. Nakon dugotrajnih merenja snimljene su P-V karakteristike u toku godišnjih doba (slika 4.11).





Treći Objekat



Četvrti Objekat

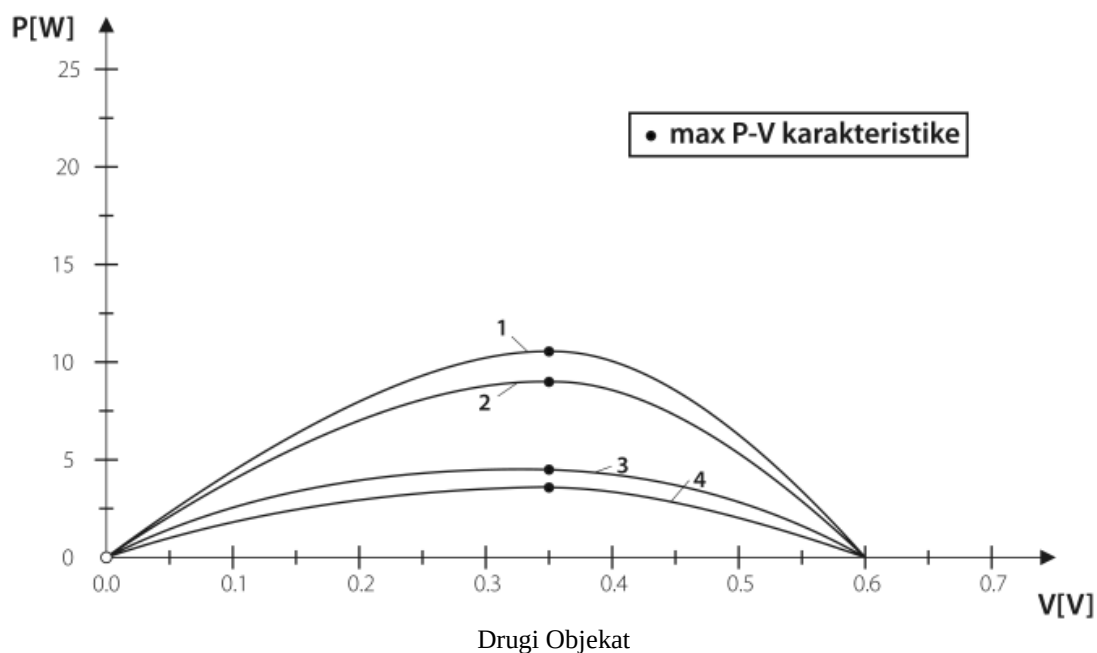
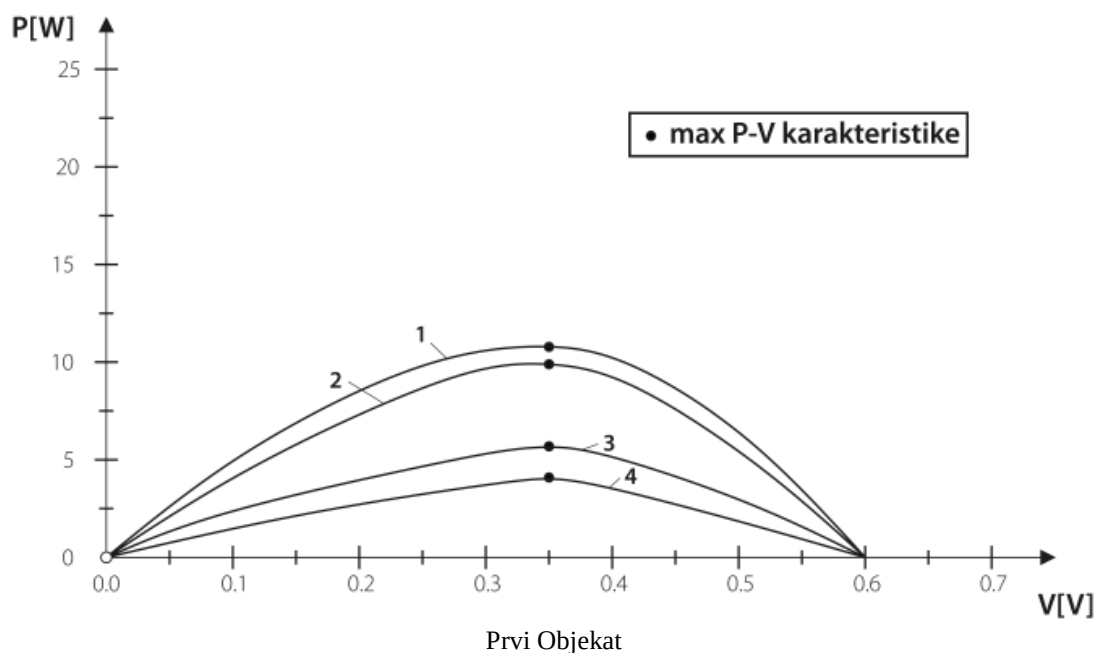
Slika 4.11. Snimljene P-V karakteristike u toku godišnjih doba na Objektima (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), uz konfiguraciju panela na krovu kuća: 1-letno, 22.06.2018.; 2-proleće, 25.03.2018.; 3-zima, 22.12.2017.; 4-jesen, 22.09.2017.

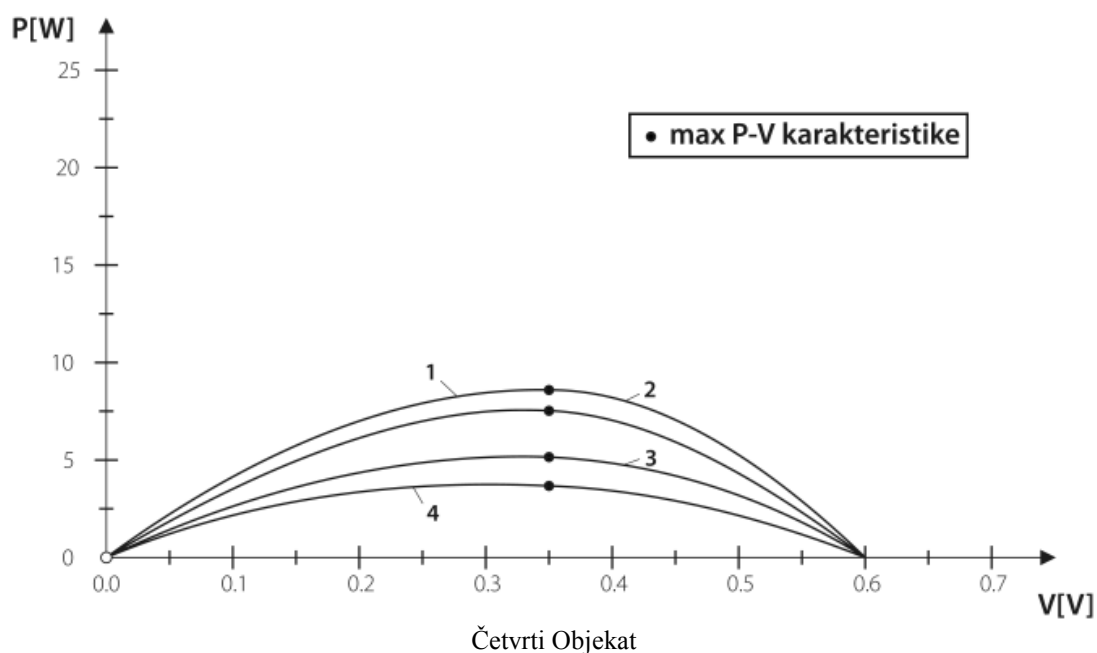
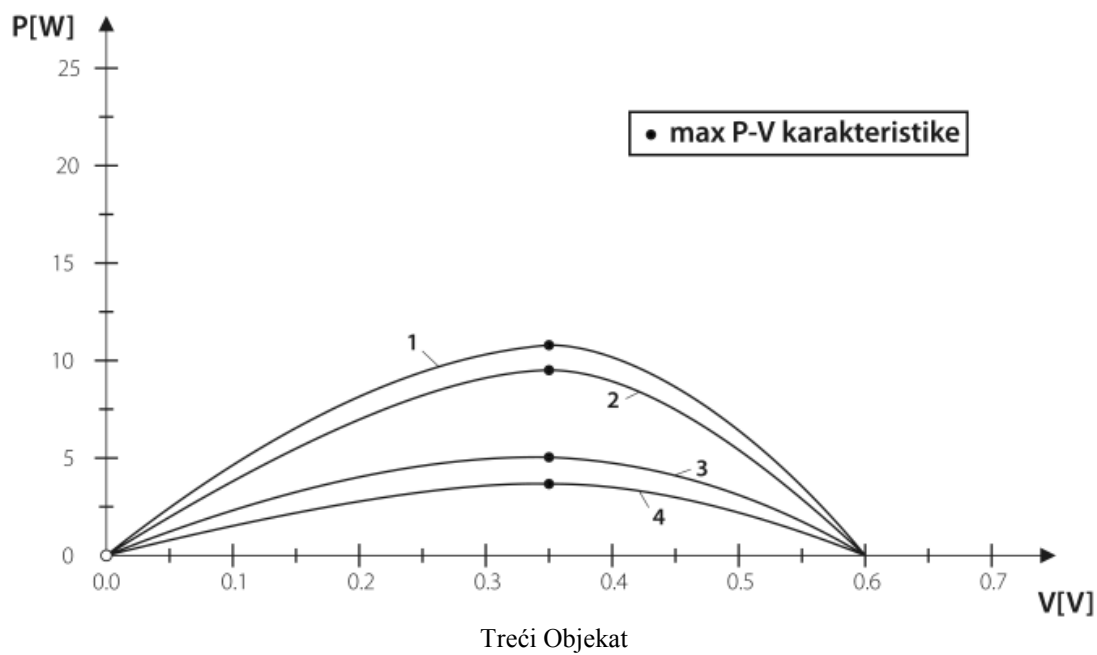
Krive prikazane na slici 4.11 pokazuju sve elemente sezonskog ponašanja. Takođe se vidi da energetska efikasnost solarnih ćelija postavljenih na krovove objekata zavisi od orijentacije objekta u odnosu na pravac istok-zapad, ali u značajnijoj meri i od krivine krova. Naime, što je kosina manja efikasnost je veća. Ekstrapolacijom ovog rezultata moglo bi se

zaključiti da bi efikasnost solarnih ćelija bila maksimalna za slučaj ravnog krova, ali takav oblik krova nije preporučiv za klimatske uslove posmatrane oblasti.

4.3.2. Snaga FN monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela postavljenih na fasade Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), za sezonu 2017/18.

Na Objektima (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), su simulacijom postavljeni FN solarni paneli na fasade. Nakon dugotrajnih merenja snimljene su P-V karakteristike u toku godišnjih doba (slika 4.12).





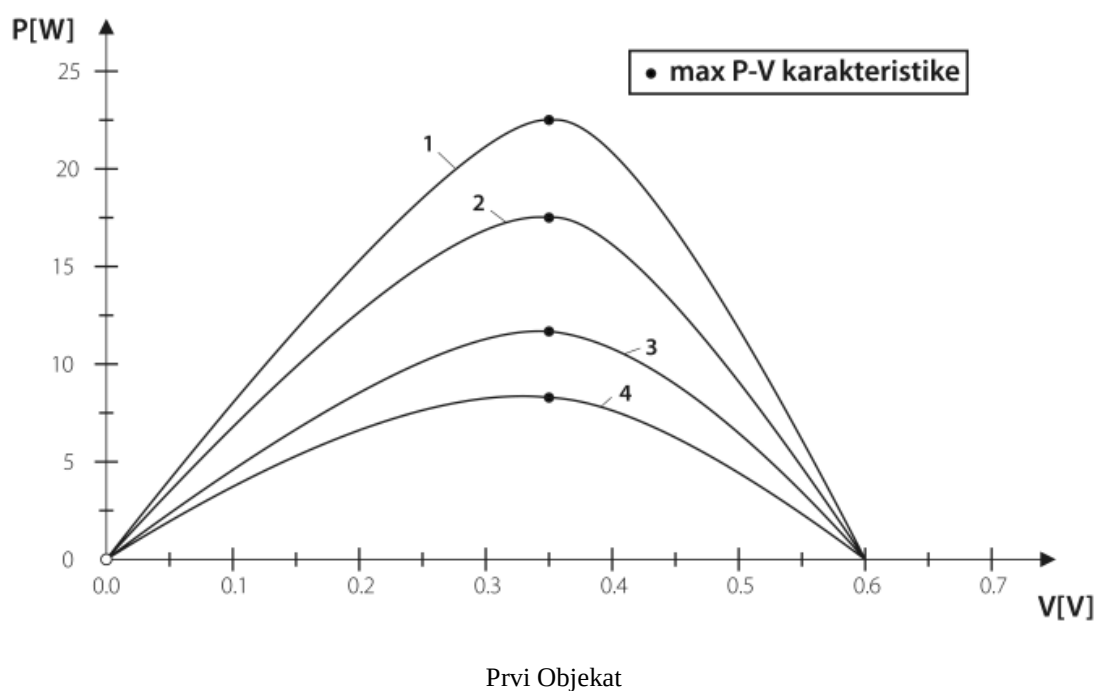
Slika 4.12. Snimljene P-V karakteristike u toku godišnjih doba na Objektima (prvi, drugi, treći, četvrti objekat) uz konfiguraciju panela na fasadama kuća: 1-leto, 22.06.2018.; 2-proleće, 25.03.2018.; 3-zima, 22.12.2017.; 4-jesen, 22.09.2017.

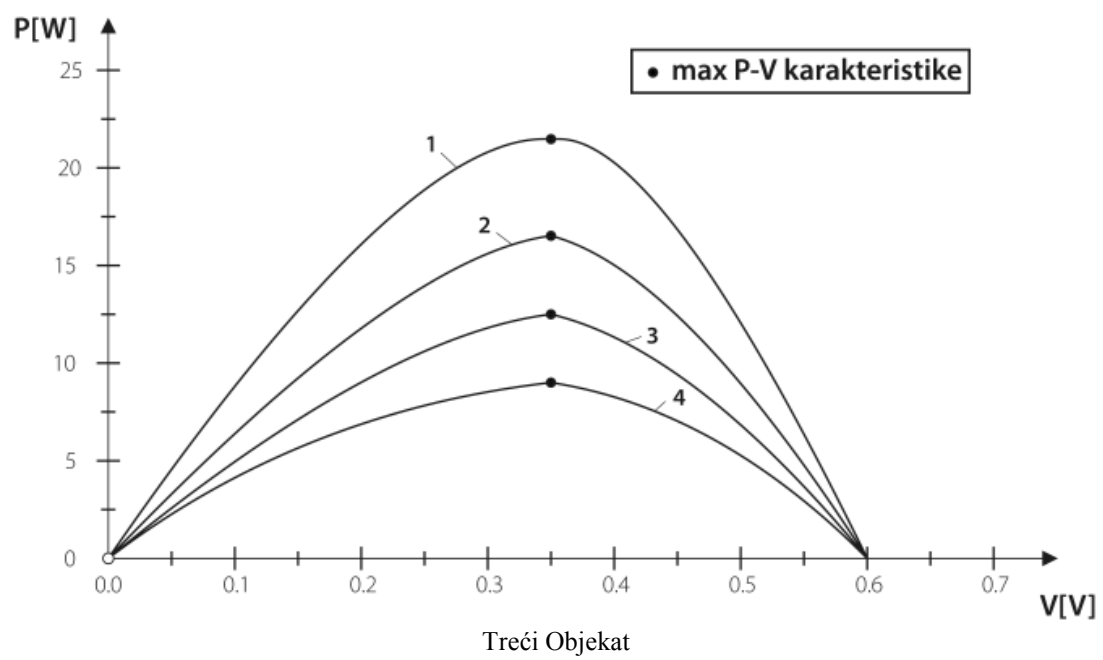
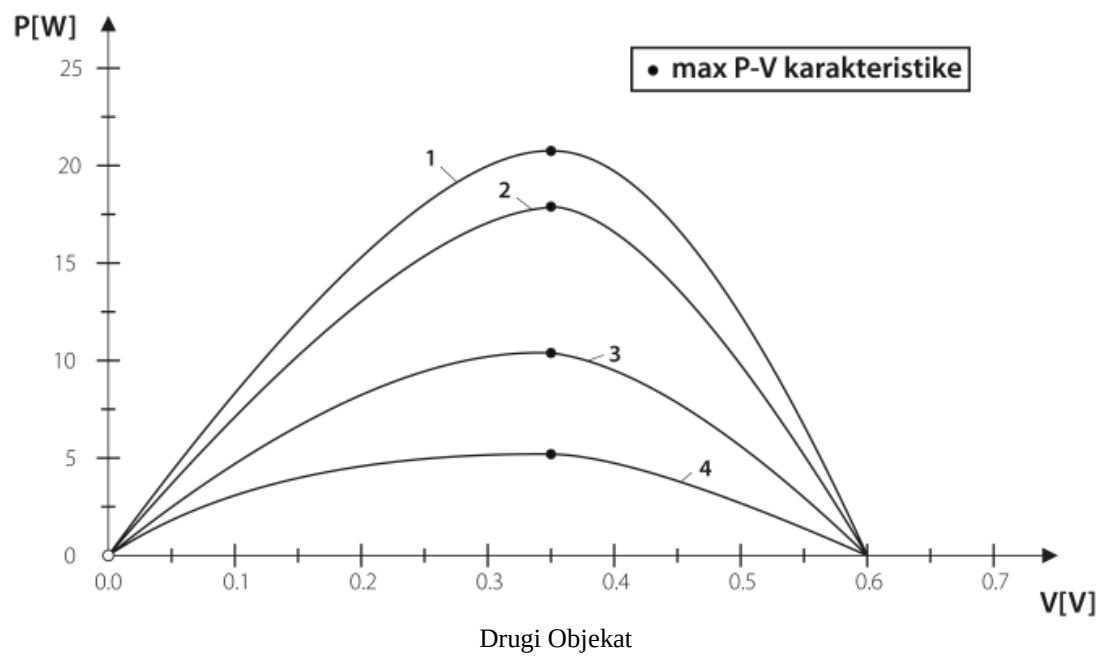
Krive prikazane na slici 4.12 ukazuju na postojanje izraženog sezonskog ponašanja povezanog sa intezitetom i trajanjem sunčanog dana. Takođe se vidi da na ekonomičnost solarnih panela integrisanih u fasadu objekta utiče položaj objekta u odnosu na pravac istok-zapad, pošto upravo ovaj parametar utiče na trajanje direktne osvetljenosti solarne čelije sunčanim zracima.

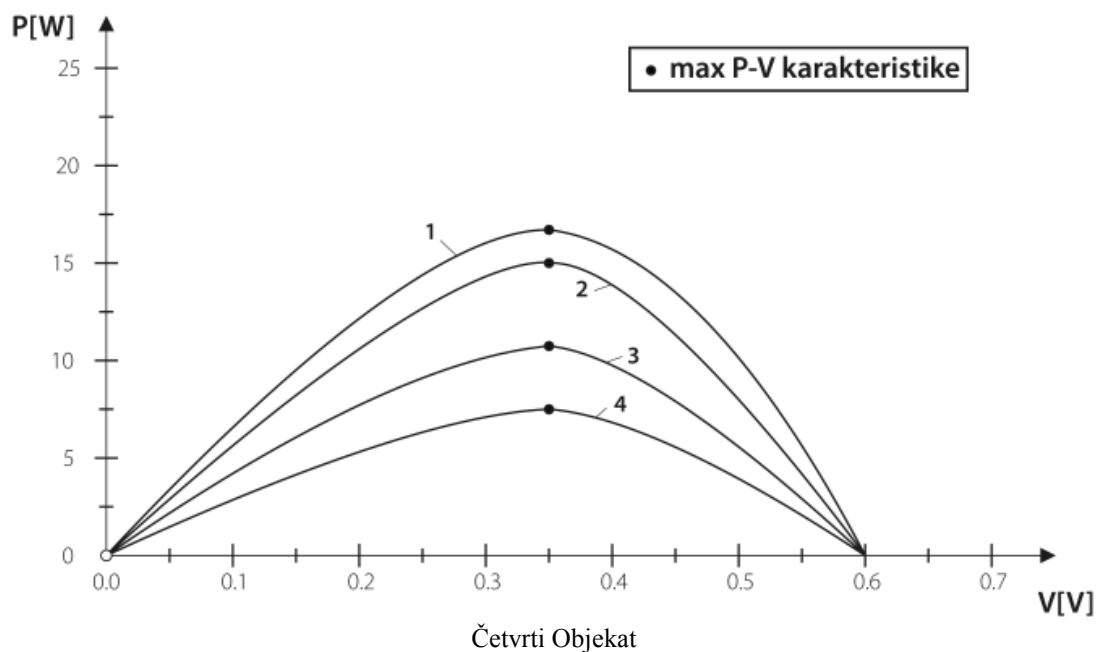
Takođe se uočava poređenjem sa dijagramima sa slike 4.11, da je postavljanje solarnih panela na krovove objekata znatno ekonomičnije od postavljanja istih solarnih panela na fasadu objekata.

4.3.3. Snaga FN monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela sa stiroporom postavljenih na krov Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), za sezonu 2017/18.

Radi postizanja boljeg komfora u smislu veće energetske efikasnosti, pre postavljanja FN solarnih panela postavljen je stiropor kao materijal koji će uticati na termičke karakteristike i poboljšati samim tim i energetska efikasnost objekata. U takvim uslovima snimljene su P-V karakteristike FN solarnih panela (slika 4.13), su pokazale da upotrebom termičkog materijala (stiropora), energetska efikasnost objekata je veća za 4-5%.





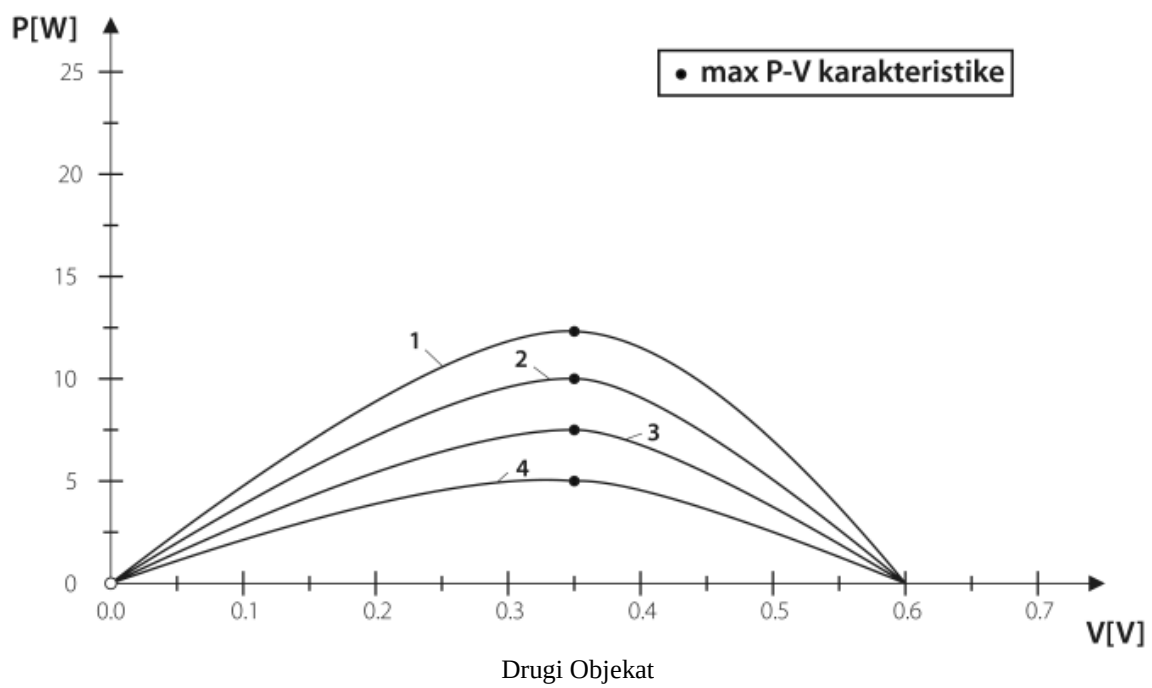
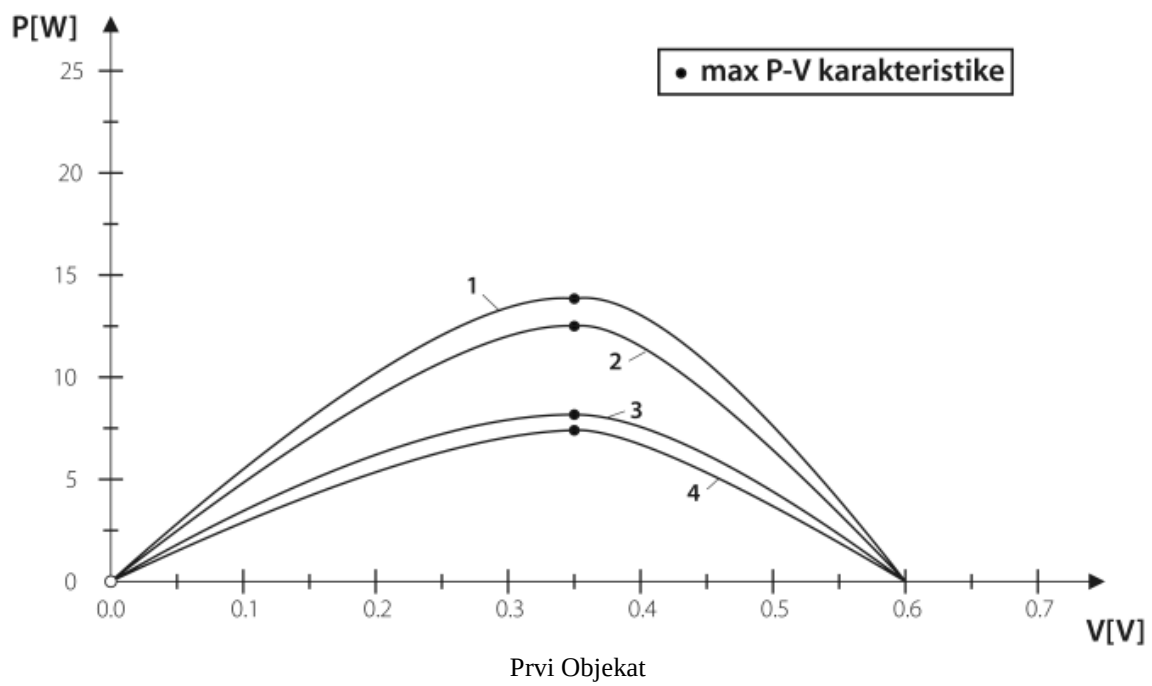


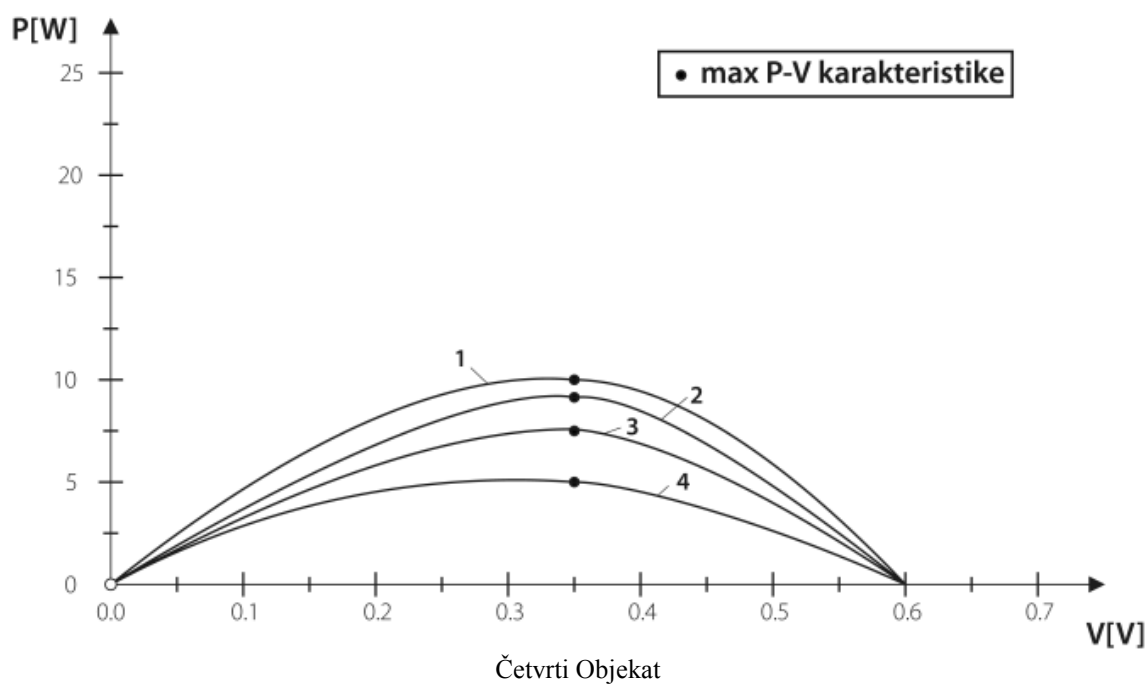
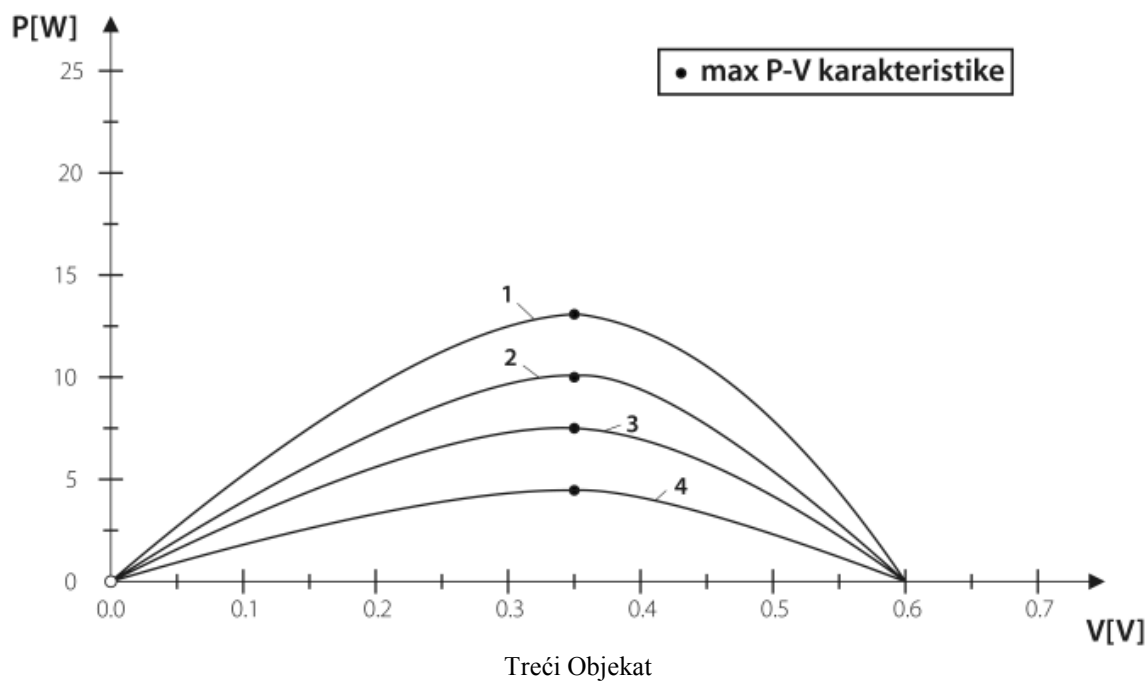
Slika 4.13. Snimljene P-V karakteristike u toku godišnjih doba na Objektima (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), uz konfiguraciju panela na krovovima zajedno sa stiroporom: 1-letno, 22.06.2018.; 2-proleće, 25.03.2018.; 3-zima, 22.12.2017.; 4-jesen, 22.09.2017.

Dijagrami postavljeni na slici 4.13, ukazuju na veću efikasnost solarnih panela koji su postavljeni na krov, ali je ispod njih postavljen stiropor. To je posledica složene promene otpornosti silicijuma sa temperaturom (naime, u sopstvenoj oblasti otpornost silicijuma opada sa temperaturom a pošto je solarna ćelija izvor stalnog napona, usled toga dolazi do opadanja snage).

4.3.4. Snaga FN monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela sa stiroporom postavljenih na fasade Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), za sezonu 2017/18.

U prethodnom potpoglavlju je izvršena simulacija objekata FN solarnih panela sa stiroporom na krovove posmatranih objekata. Ovde je sada izvršena simulacija objekata tako što su FN solarni paneli zajedno sa stiroporom postavljeni na fasade objekata, a merenja su pokazala da sa postavljenim termičkim materijalom ispod FN solarnih panela, snimljene P-V karakteristike su se pokazale bolje za 4-5% (slika 4.14).





Slika 4.14. Snimljene P-V karakteristike u toku godišnjih doba na Objektima (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), uz konfiguraciju panela na fasadama zajedno sa stiroporom: 1-letno, 22.06.2018.; 2-proleće, 25.03.2018.; 3-zima, 22.12.2017.; 4-jesen, 22.09.2017.

Dijagrami postavljeni na slici 4.14, ukazuju na veću efikasnost solarnih panela koji su postavljeni na fasade, ali je ispod njih postavljen stiropor. Međutim, uočava se da je daleko efikasnija primena solarnih panela na krovu objekata nego na fasadama istih objekata.

Na osnovu izvršenih merenja snage FN monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela odabranih nisko-energetskih objekata, potrebno je izvršiti analizu maksimalne snage fotovoltaike, što se može videti u narednom podpoglavlju.

4.3.5. Analiza maksimalne snage FN monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela u materijalizaciji nisko-energetskih Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), za sezonu 2017/18.

U tabeli 4.3. analizirani su dobijeni rezultati maksimalne snage FN monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela u materijalizaciji nisko-energetskih Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat).

Tabela 4.3. Maksimalne snage FN monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela u materijalizaciji nisko-energetskih Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), za 2017/18. godinu

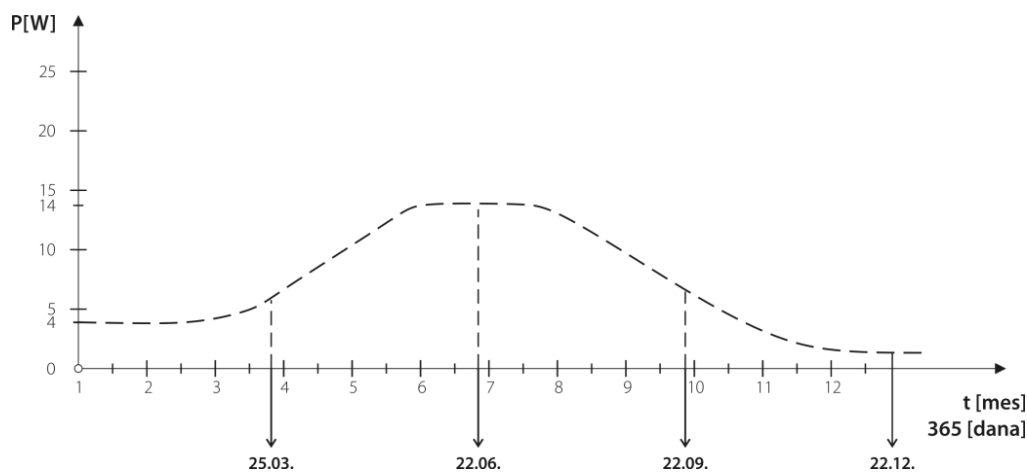
Maksimalne snage FN monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela za 2017/18.		
Prvi Objekat	krov	21
	krov + stiropor	24,5
	fasade	11
	fasade + stiropor	14
Drugi Objekat	krov	17,5
	krov + stiropor	21
	fasade	9
	fasade + stiropor	11,5
Treći Objekat	krov	19
	krov + stiropor	21,5
	fasade	10
	fasade + stiropor	13
Četvrti Objekat	krov	15
	krov + stiropor	17
	fasade	7,5
	fasade + stiropor	10

Zaključujemo da na osnovu analize date u tabeli 4.3. najbolje karakteristke efikasnosti i pouzdanosti ovom materijalizacijom su postignute na prvom Objektu, koji će kasnije biti korišćen kao model primene solarnih panela druge generacije solarne ćelije. Pored toga, postavlja se pitanje koliko iznosi promena snage FN monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela na godišnjem nivou, pri otvorenim kontaktima temperature za iste odabrane objekte. Odgovor na pitanje je dato u narednom podpoglavlju.

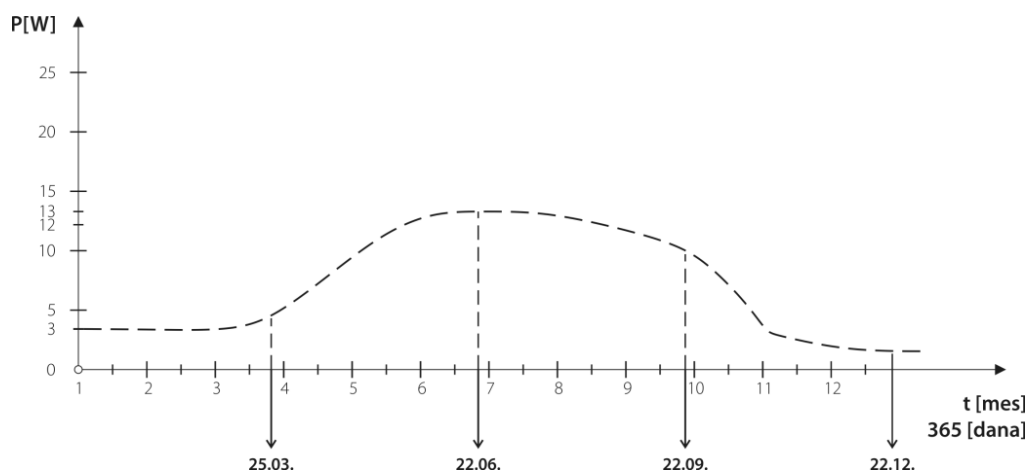
4.3.6. Promena snage FN monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela, pri otvorenim kontaktima temperature za nisko-energetske Objekte (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), za sezonu 2017/18.

Na osnovu prethodnih istraživanja i dobijenih rezultata vezanih za dobijene snage FN solarnih panela na fasadama Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), postavlja se pitanje kolika je promena snage FN monokristalnih silicijumskih solarnih panela na godišnjem nivou na osnovu parametara koji su korišćeni u prethodnom potpoglavlju, a za određivanje snage istih solarnih panela na fasadama Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat). Na osnovu gore navedenih parametara, merenjima su dobijeni sledeći rezultati:

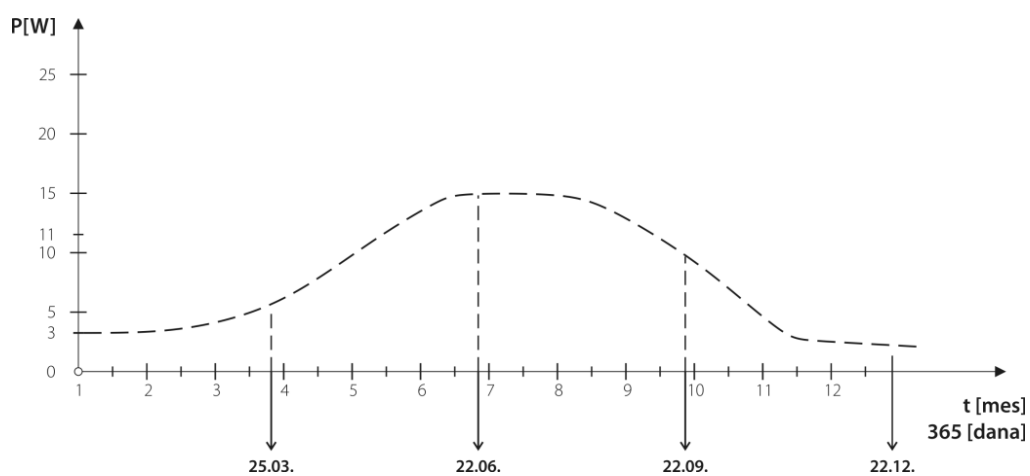
- 1) Promena snage FN solarnih panela, postavljeni na krov Objekta (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), simulacijom, (slika 4.15);
- 2) Promena snage FN solarnih panela, postavljeni na krov Objekta (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), uz postavku dodatnog materijala, tj. termičke izolacije, stiropora, simulacijom, (slika 4.16);
- 3) Promena snage FN solarnih panela, postavljeni na fasade Objekta (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), simulacijom (slika 4.17);
- 4) Promena snage FN solarnih panela, postavljeni na fasade Objekta, (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), uz postavku dodatnog materijala, tj. termičke izolacije, stiropora, simulacijom (slika 4.18).



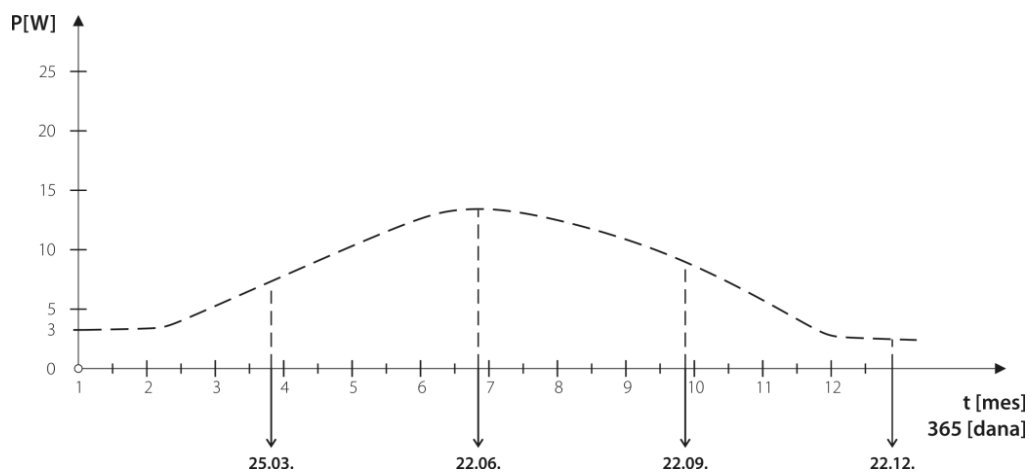
Prvi Objekat



Drugi Objekat



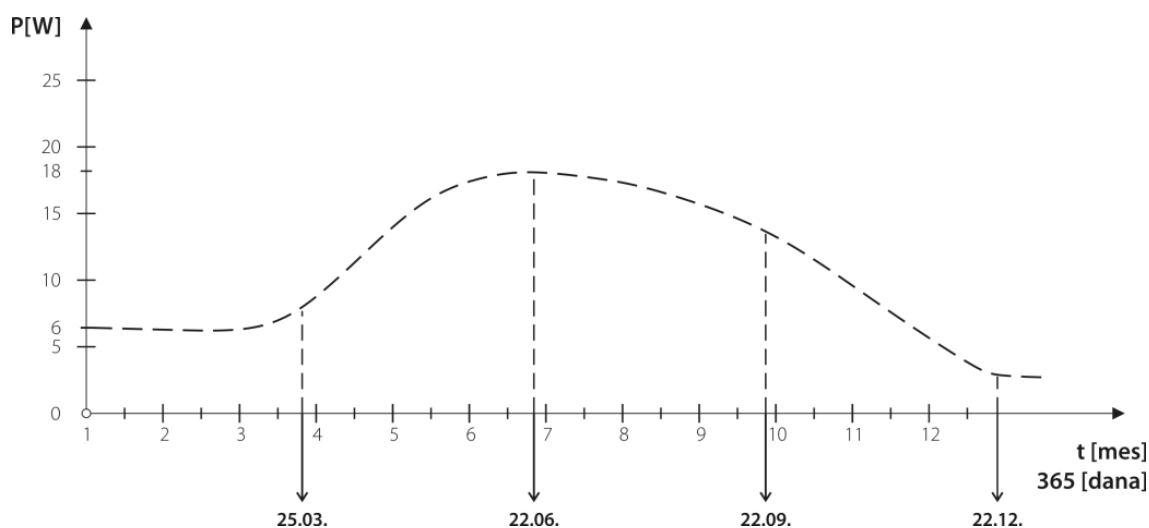
Treći Objekat



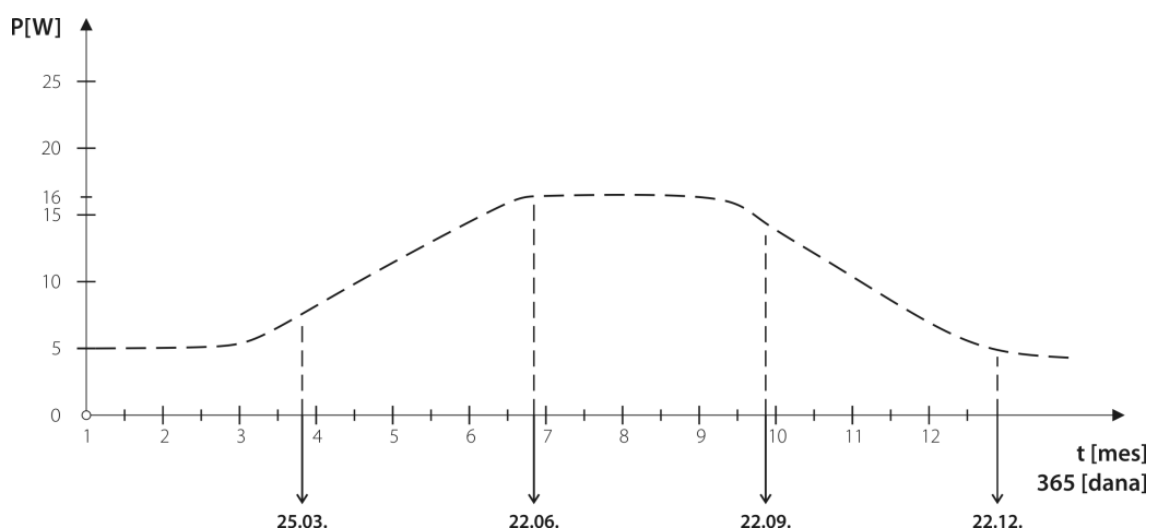
Četvrti Objekat

Slika 4.15. Dnevna kriva promene snage $P[W]$ monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela pri otvorenim kontaktima temperature za Objekte (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), FN solarni paneli postavljeni na krovove Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat)

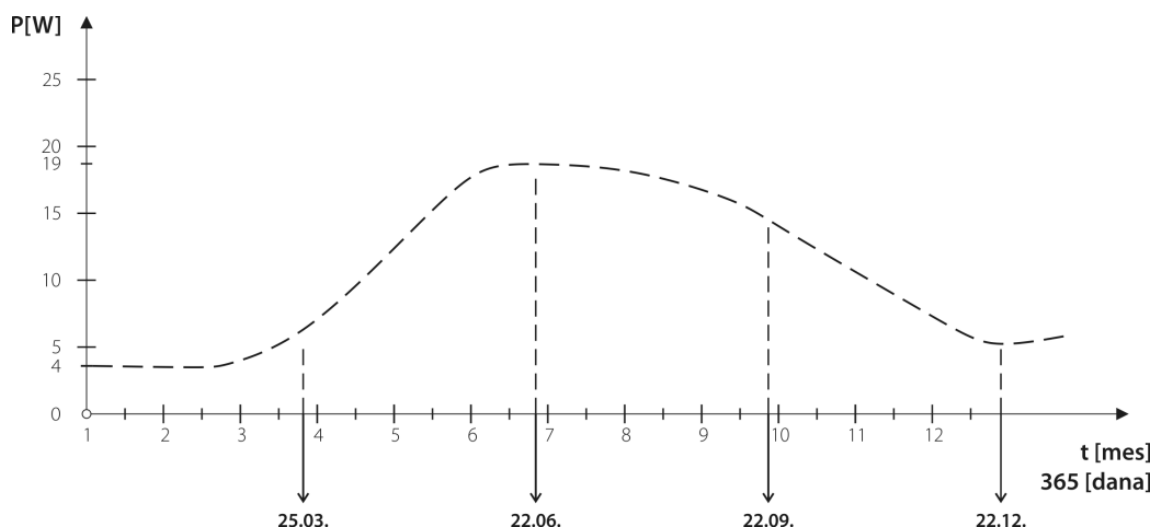
Dijagrami sa slike 4.15, potvrđuju prethodno izneseni zaključak o sezonskom ponašanju efikasnosti solarnih ćelija postavljenih na krovove posmatranih objekata. Energetska efikasnost solarnih ćelija postavljenih na krovove objekata zavisi od orijentacije objekta u odnosu na pravac istok-zapad, ali u značajnijoj meri i od krivine krova. Naime, što je kosina manja efikasnost je veća.



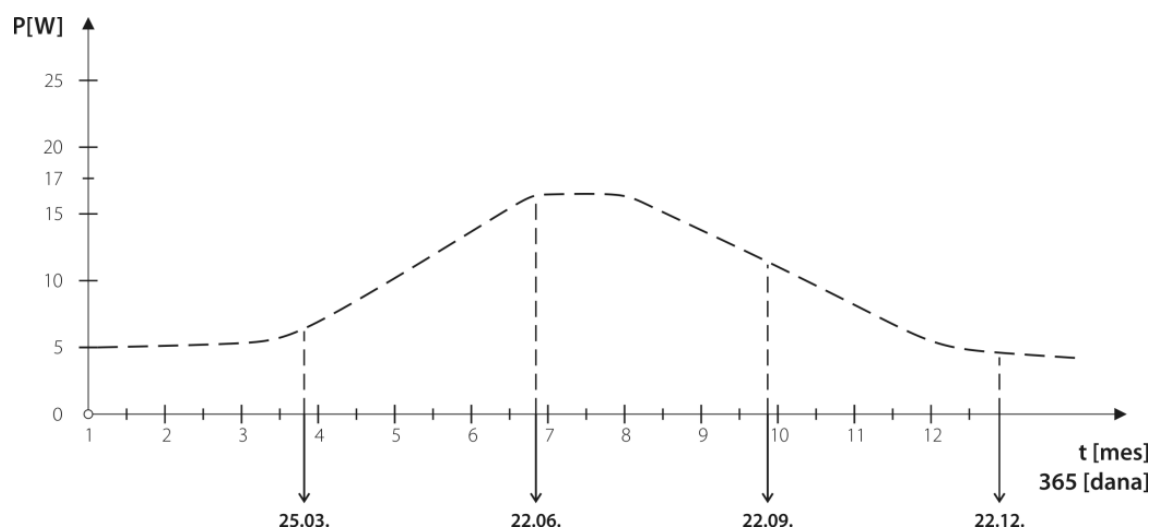
Prvi Objekat



Drugi Objekat



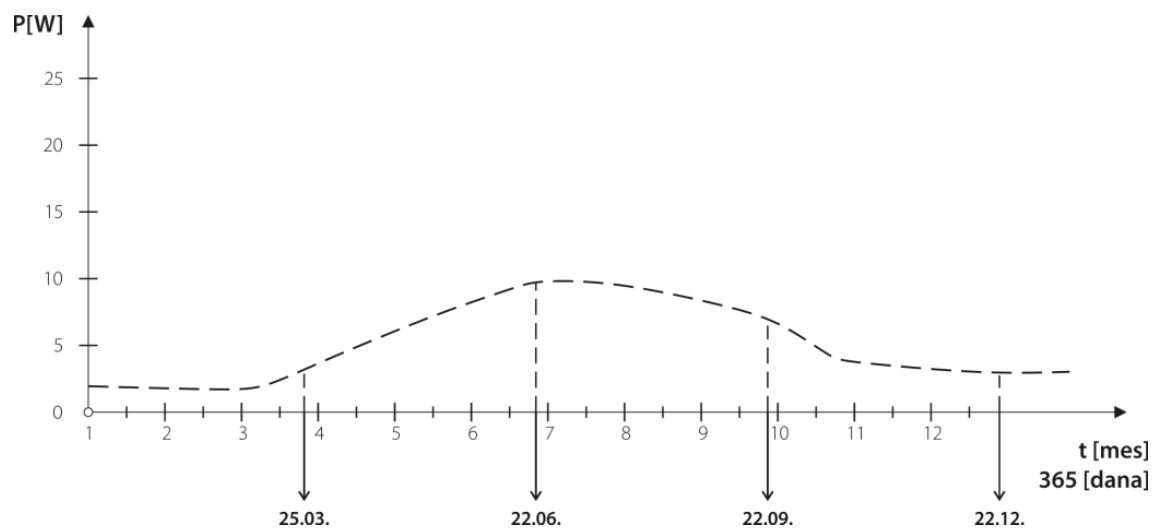
Treći Objekat



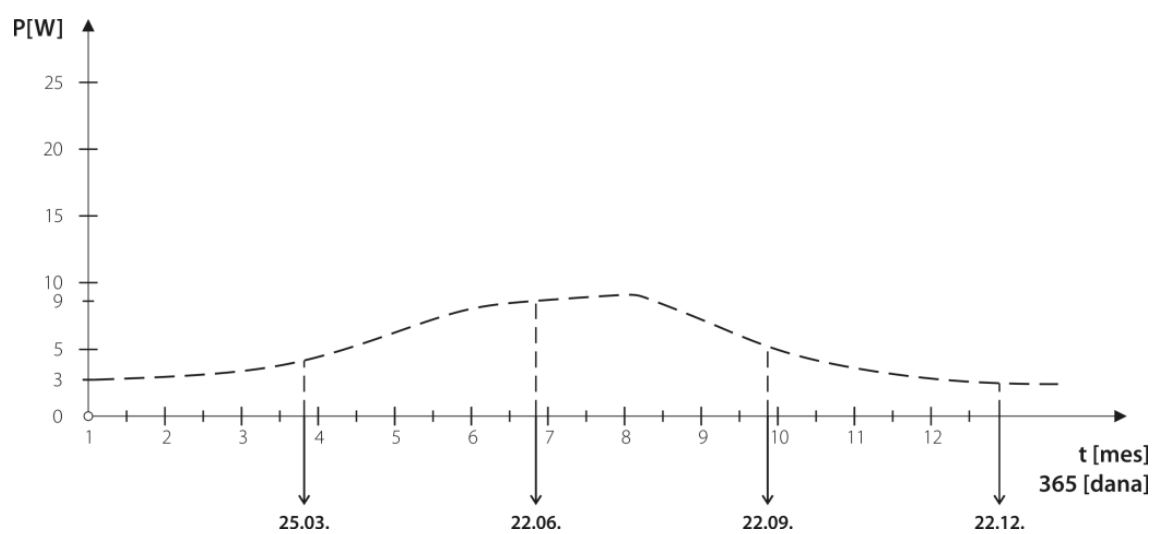
Četvrti Objekat

Slika 4.16. Dnevna kriva promene snage $P[W]$ monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela pri otvorenim kontaktima temperature za Objekte (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), FN solarni paneli, zajedno sa stiroporom, postavljeni na krovove Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat)

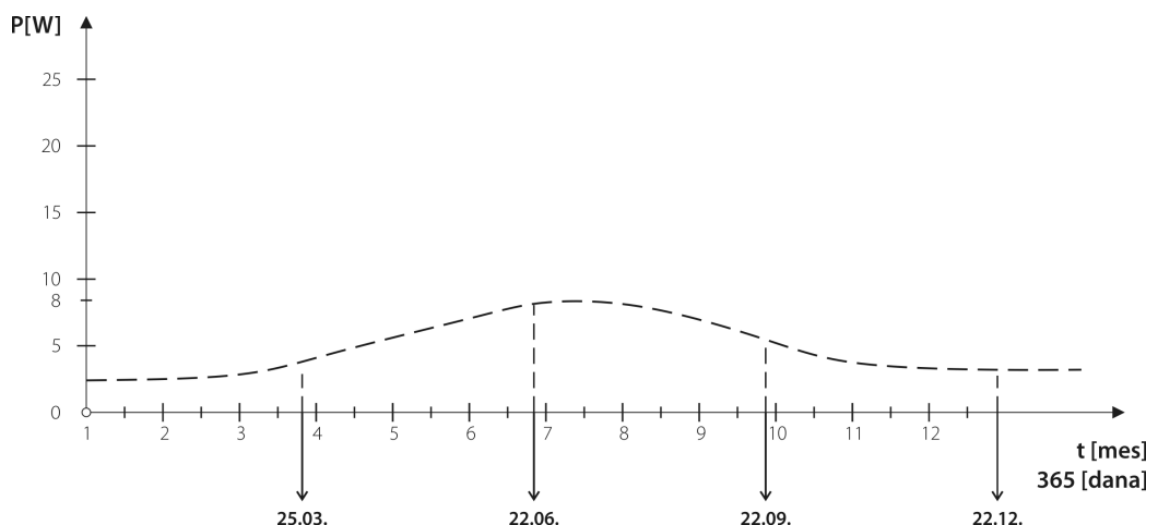
Dijagrami sa slike 4.16, potvrđuju prethodno izneseni zaključak o sezonskom ponašanju efikasnosti solarnih ćelija postavljenih na krovove posmatranih objekata. Odnosno, ukazuju na veću efikasnost solarnih panela koji su postavljeni na krov, kada je ispod njih postavljen stiropor. To je posledica složene promene otpornosti silicijuma sa temperaturom (naime, u sopstvenoj oblasti otpornost silicijuma opada sa temperaturom a pošto je solarna ćelija izvor stalnog napona, usled toga dolazi do opadanja snage).



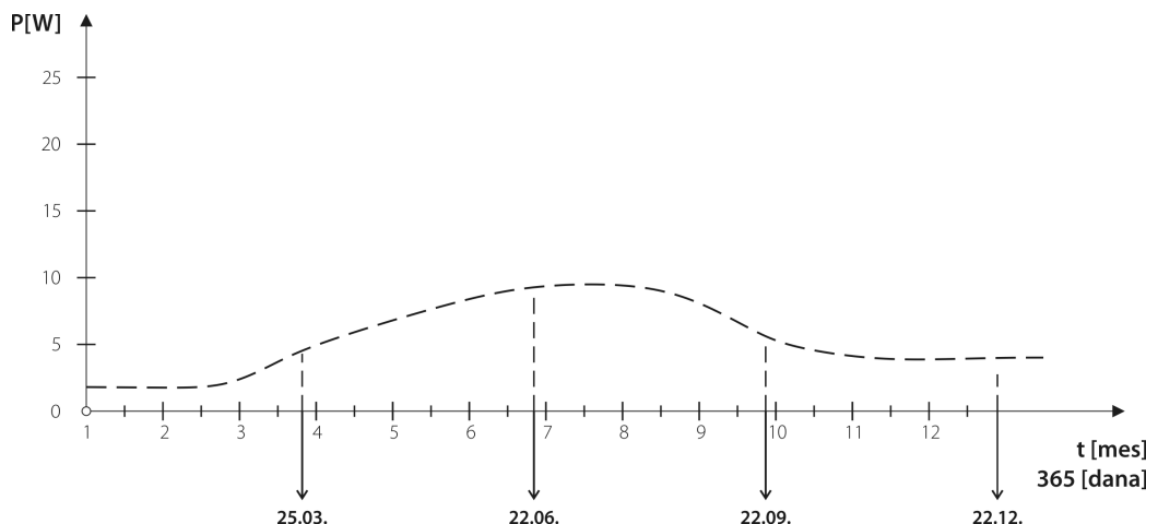
Prvi Objekat



Drugi Objekat



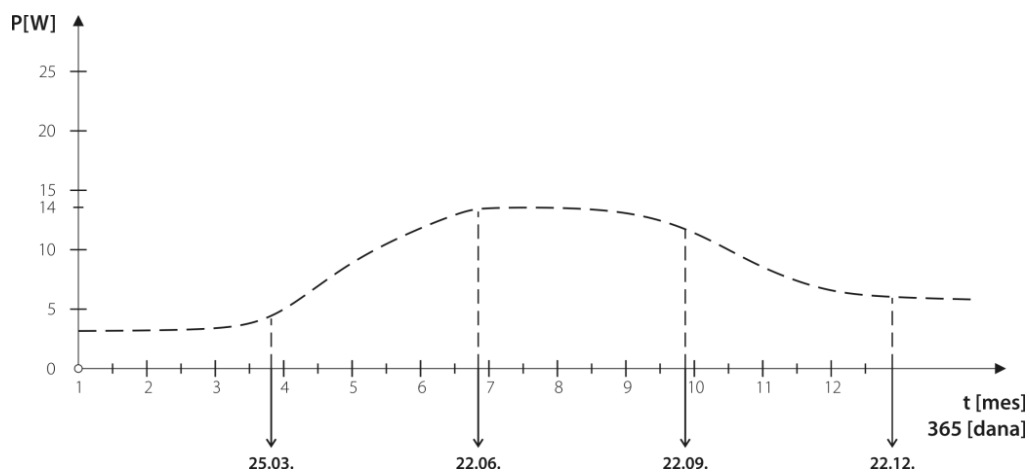
Treći Objekat



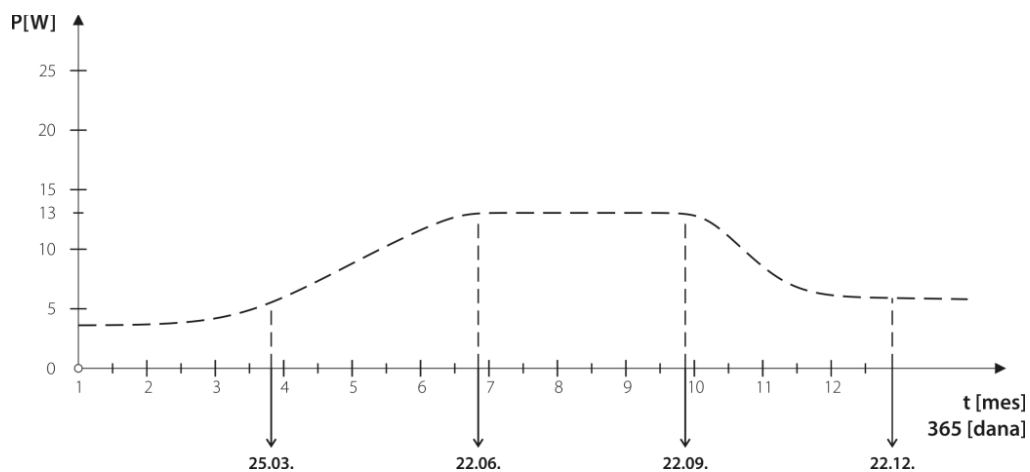
Četvrti Objekat

Slika 4.17. Dnevna kriva promene snage $P[W]$ monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela pri otvorenim kontaktima temperature za Objekte (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), FN solarni paneli postavljeni na fasade Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat)

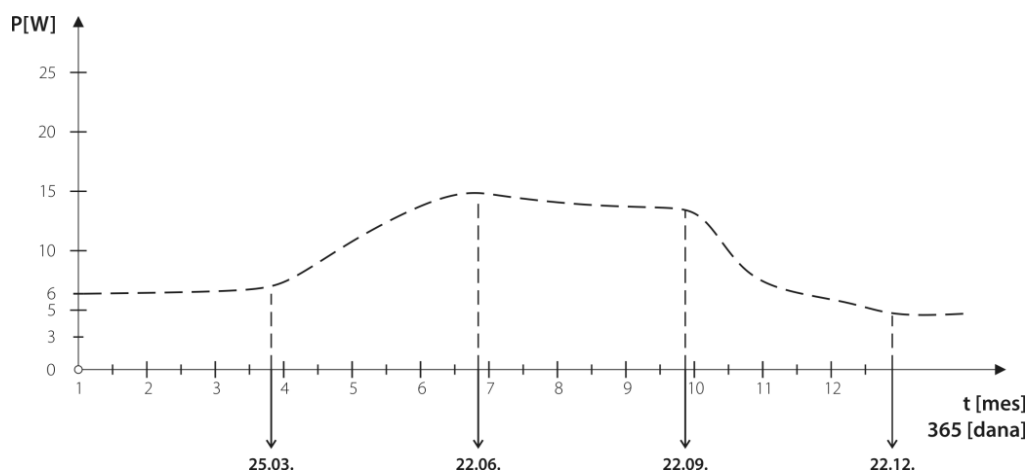
Objašnjenje za oblik krivih prikazanih na slici 4.17, potvrđuje vezu inteziteta svetlosti koja tokom vremena pada na solarnu ćeliju sa njenom efikasnosti. To govori da na ekonomičnost solarnih panela integriranih u fasadu objekta utiče položaj objekta u odnosu na pravac istok-zapad, pošto upravo ovaj parametar utiče na trajanje direktne osvetljenosti solarne ćelije sunčanim zracima. Takođe se uočava poređenjem sa dijagramima sa slike 4.16, da je postavljanje solarnih panela na krovove objekata znatno ekonomičnije od postavljanja istih solarnih panela na fasadu objekata.



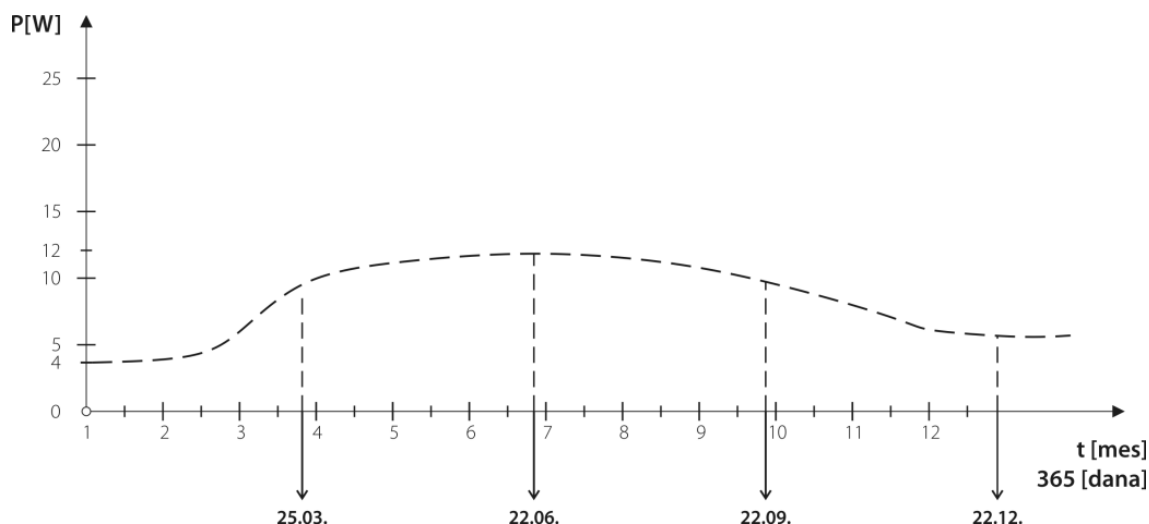
Prvi Objekat



Drugi Objekat



Treći Objekat



Četvrti Objekat

Slika 4.18. Dnevna kriva promene snage $P[W]$ monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela pri otvorenim kontaktima temperature za Objekte (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), FN solarni paneli, zajedno sa stiroporom, postavljeni na fasade Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat)

Djagrami sa slike 4.18, ukazuju na veću efikasnost solarnih panela koji su postavljeni na fasade, ali je ispod njih postavljen stiropor. Međutim, uočava se da je daleko efikasnija primena solarnih panela na krovu objekata nego na fasadama istih objekata.

Na osnovu dobijenih rezultata snimljene snage monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela u materijalizaciji nisko-energetskih Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), po godišnjim dobima, sledi analiza maksimalne snage primenjenih fotovoltaika.

4.3.7. Analiza maksimalne snage monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela u materijalizaciji nisko-energetskih Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), po godišnjim dobima, merenim u toku 2017/18. godine

Prikupljeni rezultati snimljene snage monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela u materijalizaciji nisko-energetskih Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), po godišnjim dobima, su analizirani i prikazani u tabeli 4.4.

Tabela 4.4. Analiza maksimalne snage monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela u materijalizaciji nisko-energetskih Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), po godišnjim dobima, merenim u toku 2017/18. godine

Promena snage FN monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela za 2017/18.godinu
--

	2017/18. godina	izmerena vrednost maksimalne snage na fasadama objekata			
posmatrani objekat	godišnje doba	krov	krov +stiropor	fasada	fasada + stiropor
Prvi Objekat	proleće	6	8	3	5
	leto	14	19	10	11
	jesen	10	16	8	12
	zima	4	6	2	3

Promena snage FN monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela za 2017/18.godinu					
	2017/18. godina	izmerena vrednost maksimalne snage na fasadama objekata			
posmatrani objekat	godišnje doba	krov	krov +stiropor	fasada	fasada + stiropor
Drugi Objekat	proleće	5	8	5	5
	leto	13	16	9	13
	jesen	12	14	7	13
	zima	3	5	2	4

Promena snage FN monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela za 2017/18.godinu					
	2017/18. godina	izmerena vrednost maksimalne snage na fasadama objekata			
posmatrani objekat	godišnje doba	krov	krov +stiropor	fasada	fasada + stiropor
Treći Objekat	proleće	4	6	4	7
	leto	15	18	8	15
	jesen	11	15	6	13
	zima	3	5	2	5

Promena snage FN monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela za 2017/18.godinu					
	2017/18. godina	izmerena vrednost maksimalne snage na fasadama objekata			
posmatrani objekat	godišnje doba	krov	krov +stiropor	fasada	fasada + stiropor
Četvrti Objekat	proleće	6	7	4	11
	leto	13	17	10	12
	jesen	9	12	6	9
	zima	3	5	2	4

Na osnovu analize date u tabeli 4.3, i u tabeli 4.4, zaključak bi bio da su najbolje karakteristike efikasnosti i pouzdanosti ovom materijalizacijom postignute na prvom Objektu. Iz tog razloga se prvi Objekat, uzima za model materijalizacije FN solarnim panelima izrađenih od dva materijala druge generacije solarne ćelije, kadijum telurid (CdTe) i bakar indijum diselenid (CIS), da bi se sagledali rezultati tako dobijene maksimalne snage. Primena dva elementa druge generacije FN tehnologije, na odabranom modelu (Prvi Objekat), data je u sledećem podpoglavlju.

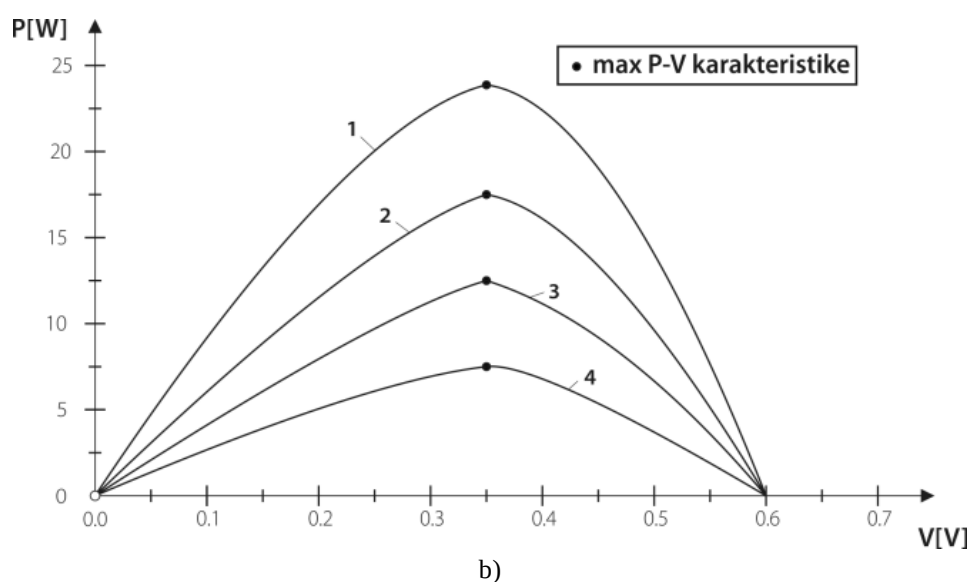
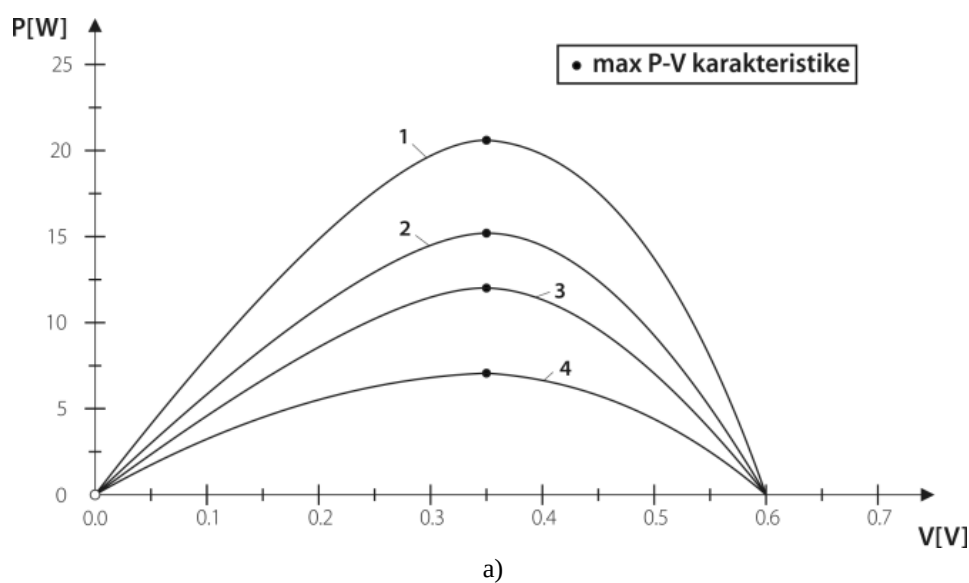
4.4. Primena kadijum telurida (CdTe) i bakar indijum diselenida (CIS) u materijalizaciji odabranog modela nisko-energetskog Objekta-prvi objekat

U ovom ispitivanju koristiće se u narednom merenju kadijum telurid (CdTe) i bakar indijum diselenid (CIS), kao bolji materijali druge generacije FN tehnologije, koji daju manju efikasnost (tabela 3.1.).

Obe vrste FN solarnih ćelija i kadijum telurid (CdTe) i bakar indijum diselenid (CIS) biće postavljeni na modelu-prvi Objekat. Dobijena merenja daće potvrdu o kvalitetu upotrebljenih materijala za FN solarne panele na osnovu izmerene snage solarnih panela na prvom Objektu.

4.4.1. Primena solarne ćelije-kadijum telurid (CdTe) na modelu-prvi Objekat

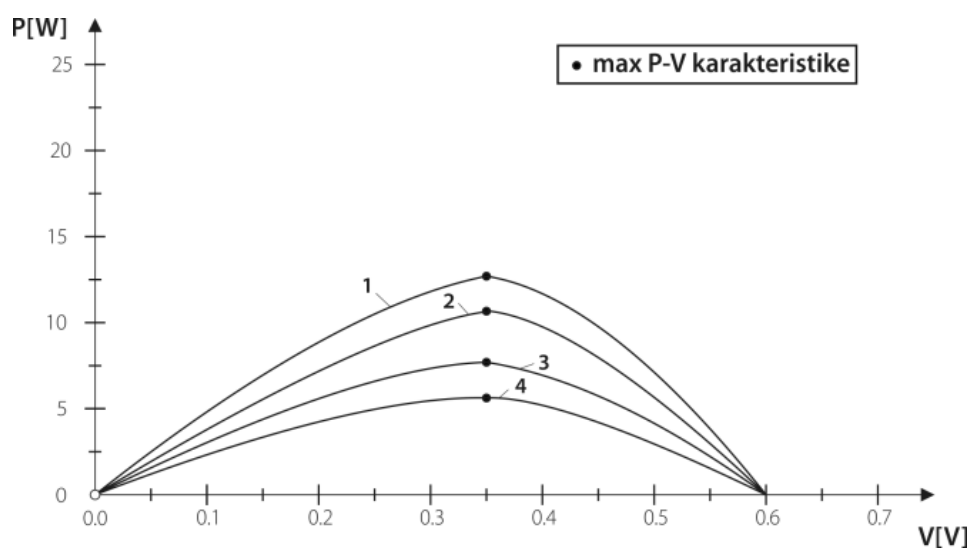
Primena kadijum telurida (CdTe) za FN solarne ćelije, odnosno panele postavljene na krov modela-prvi Objekat, slika 4.19.



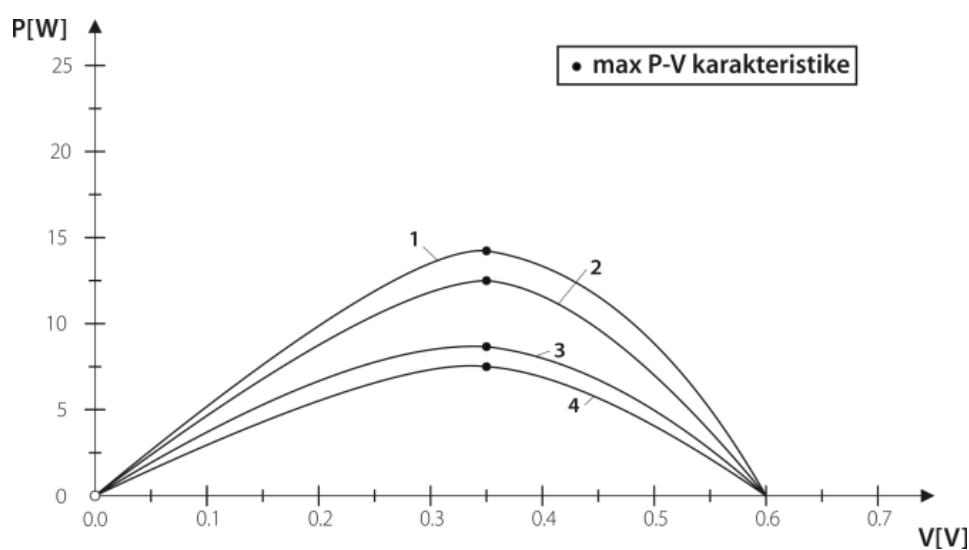
Slika 4.19. Snimljene P-V karakteristike kadijum telurida (CdTe) u toku godišnjih doba na modelu-prvi Objekat, uz konfiguraciju panela: a) na krovu objekta; b) na krovu objekta zajedno sa stiroporom; 1-leto, 22.06.2018.; 2-proleće, 25.03.2018.; 3-zima, 22.12.2017.; 4-jesen, 22.09.2017.

Na osnovu slike 4.19 se uviđa da je solarna ćelija od kadijum telurida (CdTe) postigla malo veću efikasnost, zahvaljujući kvalitetu poluprovodnika, od monokristalnih silicijumskih solarnih ćelija postavljenih na krov modela-prvi Objekat.

Primena kadijum telurida (CdTe) za FN solarne ćelije, odnosno panele postavljene na fasade prvog Objekta, slika 4.20.



a)



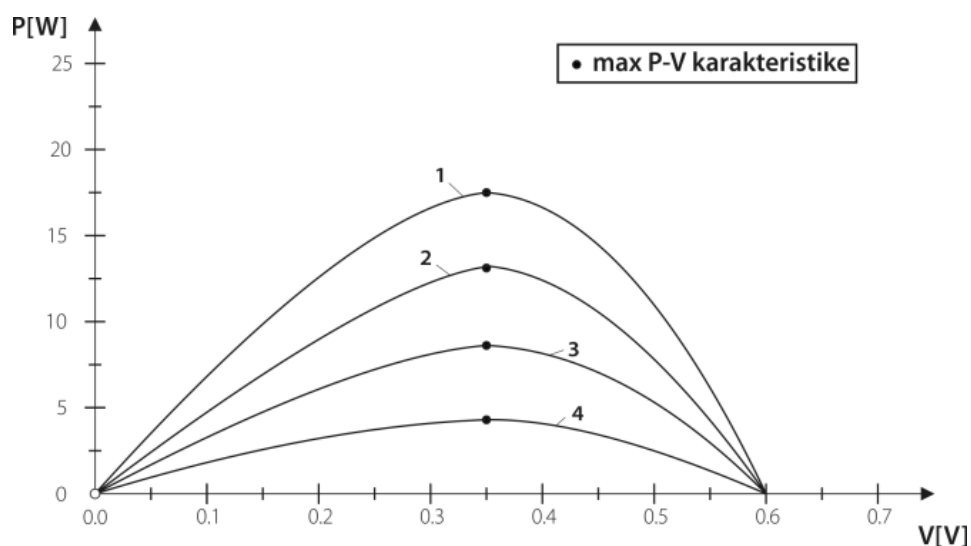
b)

Slika 4.20. Snimljene P-V karakteristike kadijum telurida (CdTe) u toku godišnjih doba na modelu-prvi Objeat, uz konfiguraciju panela: a) na fasadama objekta; b) na fasadama objekta zajedno sa stiroporom; 1-leto, 22.06.2018.; 2-proleće, 25.03.2018.; 3-zima, 22.12.2017.; 4-jesen, 22.09.2017.

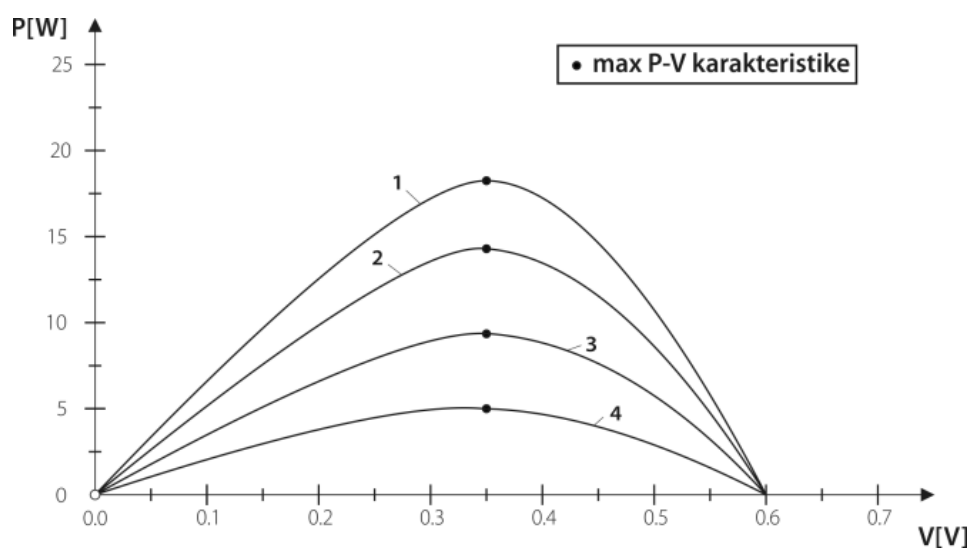
Na osnovu slike 4.20 se uviđa da je solarna ćelija od kadijum telurida (CdTe) znatno efikasnija od silicijumskih solarnih ćelija postavljenih na fasade prvog Objekta.

4.4.2. Primena solarne ćelije-bakar indijum diselenid (CIS) na modelu-prvi Objekat

Primena bakar indijum diselenida (CIS), za FN solarne ćelije, odnosno panele postavljene na krov modela-prvi Objekat, slika 4.21.



a)

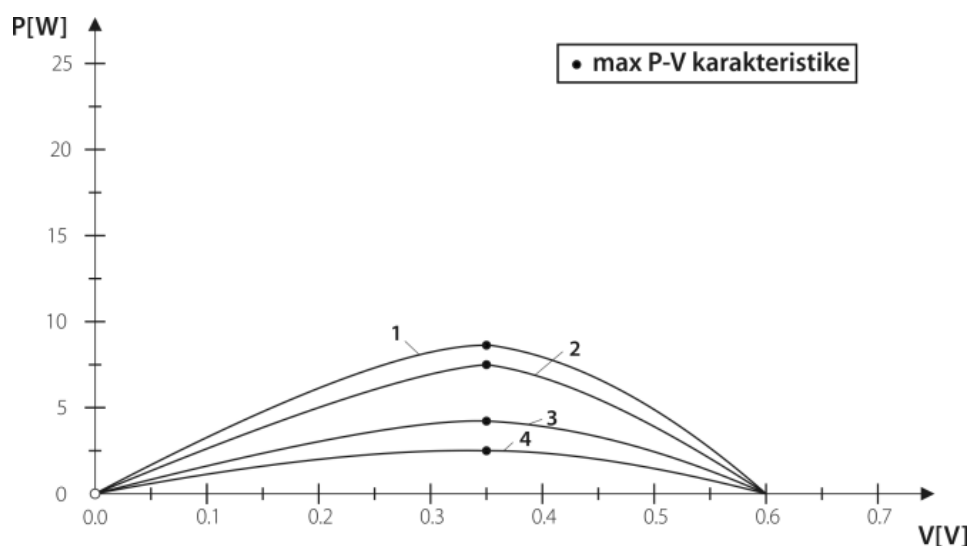


b)

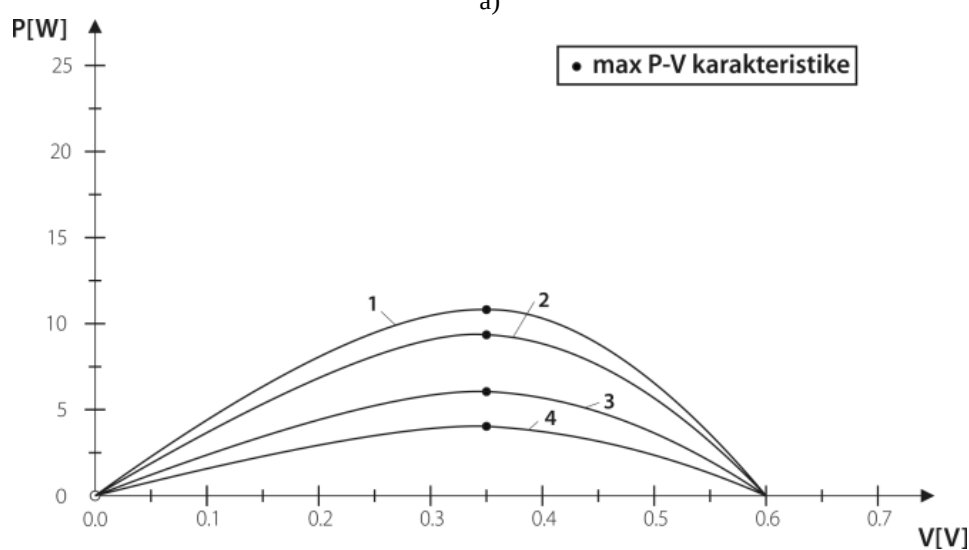
Slika 4.21. Snimljene P-V karakteristike bakar indijum diselenida (CIS)u toku godišnjih doba na modelu-prvi Objekat, uz konfiguraciju panela: a) na krovu objekta; b) na krovu objekta zajedno sa stiroporom; 1-leto, 22.06.2018.; 2-proleće, 25.03.2018.; 3-zima, 22.12.2017.; 4-jesen, 22.09.2017.

Na osnovu slike 4.21 se uviđa da je solarna ćelija od bakar indijum diselenida (CIS) manje efikasna od silicijumskih solarnih ćelija postavljenih na krov prvog Objekta.

Primena bakar indijum diselenida (CIS), za FN solarne ćelije, odnosno panele postavljene na fasade prvog Objekta, slika 4.22.



a)



b)

Slika 4.22. Snimljene P-V karakteristike bakar indijum diselenida (CIS) u toku godišnjih doba na modelu-prvi Objekat, uz konfiguraciju panela: a) na fasadama objekta; b) na fasadama objekta zajedno sa stiroporom; 1- leto, 22.06.2018.; 2-proleće, 25.03.2018.; 3-zima, 22.12.2017.; 4-jesen, 22.09.2017.

Na osnovu slike 4.22 se uviđa da je solarna ćelija od bakar indijum diselenida (CIS) manje efikasna od silicijumskih solarnih ćelija postavljenih na fasade prvog Objekta.

Na osnovu istraživanja primene dva elementa druge generacije FN tehnologije na modelu-prvi Objekat, izvršena je analiza snimljene snage navedenih solarnih panela u toku godine, koja je data tabelom 4.5, u narednom podpoglavlju.

4.4.3. Analiza maksimalne snage kadijum telurida (CdTe) i bakar indijum diselenida (CIS) u materijalizaciji modela nisko-energetskog Objekta-prvi objekat, za sezonu 2017/18.

Prikupljeni rezultati snimljene snage druge generacije FN tehnologije solarnih panela u materijalizaciji modela (prvi Objekat) za 2017/18. godinu, data je tabeli 4.5.

Tabela 4.5. Analiza maksimalne snage druge generacije FN tehnologije solarnih panela u materijalizaciji modela (prvi Objekat) za 2017/18. godinu

. Maksimalne snage druge generacije FN tehnologije solarnih panela za 2017/18.		
Prvi Objekat kadijum telurid (CdTe)	krov	22
	krov + stiropor	25,5
	fasade	12
	fasade + stiropor	14
Prvi Objekat bakar indijum diselenid (CIS)	krov	15
	krov + stiropor	17
	fasade	7,5
	fasade + stiropor	10

Najbolje karakteristike efikasnosti i pouzdanosti ovom materijalizacijom postignute na prvom Objektu. Iz tog razloga se prvi Objekat, uzima za model materijalizacije FN solarnim panelima izrađenih od dva materijala druge generacije solarne ćelije, kadijum telurid (CdTe) i bakar indijum diselenid (CIS), da bi se sagledali rezultati tako dobijene maksimalne snage. Primena dva elementa druge generacije FN tehnologije, na odabranom modelu (Prvi Objekat)Prethodna razmatranja eksperimentalnih podataka su potvrdili, intuitivno jasnu, pretpostavku da efikasnost FN solarnih panela postavljenih na fasade već izrađenih objekata zavisi od orijentacije tih objekata u odnosu na pravac istok-zapad, kao i od kosine krova (u slučaju da su ovi paneli postavljeni na krov objekta). U tom smislu manji nagib krova objekta povećava efikasnost solarnih panela, ali takvo rešenje povećavanja efikasnosti solarnih ćelija

je ograničeno bioklimatskim i geoprostornim uslovima. Takođe je ustanovljeno da izolacija solarne ćelije od krova (fasade) stiroporom povećava njihovu efikasnost.

Dobijeni rezultati na nisko-energetskim objektima, raspoređenim na četiri lokacije u Beogradu su stohastičke prirode i prikupljani su u vremenskom periodu od godinu dana. Pošto su se tokom eksperimentalnog postupka koristili profesionalni modeli solarnih ćelija, koji su pokrivali znatno manju površinu fasade objekta u cilju zaključivanja o građevinskim i energetskim efektima materijalizacije fasade integrisanjem fotonaponskih panela. U punoj dimenziji objekata primenjivan je statistički zakon porasta verovatnoće podizan, u tu svrhu, napisanim softverskim paketom.

POGLAVLJE 5

MATEMATIČKI ALGORITMI KORIŠĆENI ZA OBRADU EKSPERIMENTALNIH REZULTATA

5.1. Uvod

Imajući u vidu mogućnost uticaja svih prethodno pomenutih parametara na mogućnost donošenja jednoznačnog zaključka o građevinskim i energetske efektima materijalizacije fasade integriranjem fotonaponskih panela pored eksperimentalnog postupka nužno je primeniti matematičke algoritme koji to omogućavaju. Naime, na osnovu, uslovno rečeno, punktualnog merenja u jednogodišnjem intervalu donošenje zaključka o opravdanosti primene solarnih panela na većem delu fasade objekta na trideset godišnjem nivou moguće je samo uz primenu odgovarajućeg matematičkog algoritma.

Većina pojava u prirodi je podložna slučajnim promenama. Ova nasumičnost se često zanemaruje i umesto nje se koristi srednja vrednost u cilju objašnjenja prirodnih veza koje se istražuju. Veoma često, međutim, ekstremna, a ne srednja, je ona koja određuje karakteristiku sistema. takav slučaj se javlja i kod fotonaponske konverzije energije. Naime, fotonaponski paneli se mogu predstaviti kao paralelna veza jako velikog broja dioda dobijenih tehnološkim procesom koji ne obezbeđuje, ni približno, njihovu indentičnost. Takva struktura ima za posledicu da na vek trajanja fotonaponskih panela utiču najslabije tačke sistema i da se zaključci dobijeni na osnovu pojedinačnih ispitivanja ne mogu deterministički uopštiti već da treba primeniti metode stohastičkog uopštavanja. To podrazumeva primenu ispitivanja funkcije raspodele vremena minimalnog napona i funkciju raspodele minimalnog raspona kao i primenu zakona porasta verovatnoće na sistemu fotonaponskih panela.

Zaključujemo sledeće. Da bi se moglo razmatrati o građevinskim i energetske efektima u punoj dimenziji objekata, treba primeniti statistički zakon porasta verovatnoće podizan, u tu svrhu, napisanim softverskim paketom. To podrazumeva primenu ispitivanja funkcije raspodele vremena minimalnog napona i funkciju raspodele minimalnog raspona kao i primenu zakona porasta verovatnoće na sistemu fotonaponskih panela. Sledi analiziranje navedenih funkcija.

5.2. Funkcija raspodele vremena minimalnog napona , funkcija raspodele minimalnog raspona na sistemu fotonaponskih panela

Svedoci smo neprekidnih naučnih i tehničkih inovacija i neprekidnog porasta složenosti tehničkih sistema. Jedan od velikih problema kod projektovanja, kao i kod izgradnje složenih tehničkih sistema je njihovo održavanje u funkcionalnom stanju. Važna karakteristika složenih tehničkih sistema je njihova pouzdanost u radu.

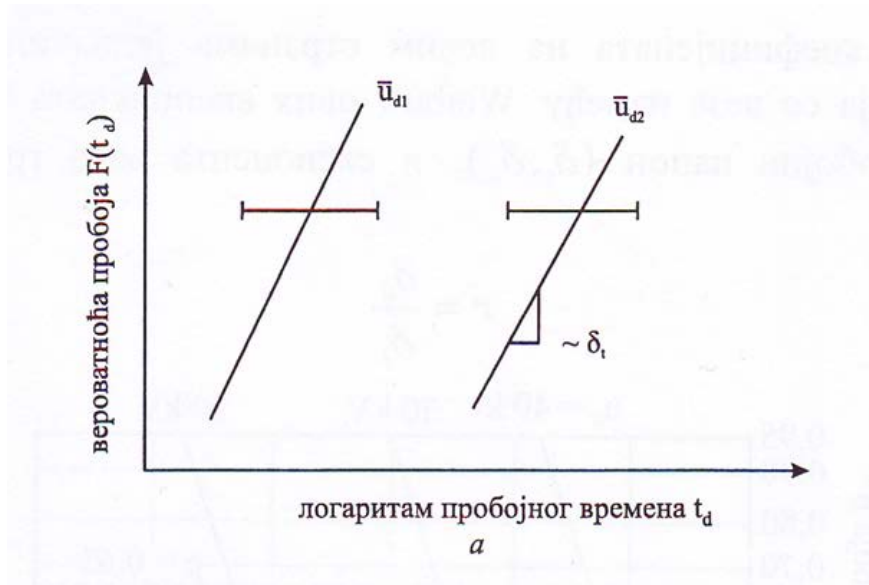
Pouzdanost se definiše kao svojstvo objekta da ispunjava zadate funkcije i održava vrednost eksploatacionih parametara tokom vremena u zadatim granicama, koje su određene zadatim režimima i uslovima korišćenja, tehničkog održavanja, remonta, skladištenja i transporta. Ili, pouzdanost je sposobnost nekog proizvoda ili robe da zadovolji, u toku primene, zahteve koji su postavljeni za ponašanje ili održavanje njihovih osobina za duži vremenski period [104].

Solarni paneli, kao poluprovodnički elementi mogu imati više stanja. Na primer poluprovodnička dioda ispravno funkcioniše kada u direktnom smeru propušta struju, odnosno otpornost je mala. U inverznom smeru ne propušta struju, odnosno otpornost je beskonačno velika. U slučaju otkaza može se desiti da dioda ima malu otpornost u oba smera (kratak spoj) ili da u oba smera ima beskonačno veliku otpornost (prekid). Navedeni elementi mogu da se nalaze u ispravnom stanju, a pri prelasku u neispravno stanje mogu da budu u kratkom spoju ili u prekidu [104].

Iz tih razloga, u ispitivanju pouzdanosti sistema koristi se Vejbulova (Weibull-ova) raspodela. Navedena raspodela koristi se za modelovanje pouzdanosti tehnološkog sistema tokom vremena eksploatacije. U procesu modelovanja važan detalj predstavlja ocenjivanje parametara navedenih raspodela.

Empirijska funkcija raspodele vremena minimalnog napona (slika 5.1) se dobija obnavljanjem ispitivanja i pogodno se opisuje *Weibull*-ovom raspodelom [105]:

$$F(t_d; u_{m1}) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t_{d1}}{t_{63}(u_{d1})} \right)^{\delta_t} \right] \quad (5.1)$$



Slika 5.1. Određivanje funkcija raspodele probojnog vremena [105]

Dijagram minimalni napon/nema minimalnog napona takozvana „karakteristika veka trajanja“, se može konstruisati pomoću odabranih kvantila ove raspodele. Ispitivanja su pokazala da takav dijagram pokazuje pravu liniju na duplogaritamskoj skali. Ako su za date kvantile poznati intervali poverenja, oni se mogu preneti na karakteristiku veka trajanja. Za svaki red kvantila p namena minimalnog napona, karakteristika veka trajanja se opisuje sa [105]:

$$u_{mp} = k_{mp} t_{mp}^{-1/r} \quad (5.2)$$

gde je:

k_{mp} – konstanta koja karakteriše geometriju strukture, a

r – eksponent veka trajanja koji uglavnom zavisi od primenjenog materijala i statističkih fluktuacija tokom tehnološkog procesa. Odstupanje od prave, na duploeksponecijalnom dijagramu karakteristike veka trajanja, ukazuje na promene u mehanizmu starenja [105].

Ako se, analogno jednačini (5.1), usvoji Weibull-ova raspodela za minimalni napon [106]:

$$F(u_m; t_{m1}) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{u_m}{u_{m63}(t_{d1})} \right)^{\delta_t} \right] \quad (5.3)$$

za minimalni napon sa fiksnim vremenom minimalnog napona t_{m1} , onda je, za iste verovatnoće minimalnog napona:

$$F(t_m; u_{m1}) = F(u_m; t_{m1}) \quad (5.4)$$

$$u_{m63}(t_{m1})[t_{m1}]^{\delta_t/\delta_u} = u[t_{m63}(u_{m1})]^{\delta_t/\delta_u} \quad (5.5)$$

Prema zakonu veka trajanja, jednačina (5.2), pod pretpostavkom da je eksponent r primenljiv na sve kvantile, dobija se [106]:

$$n_{m63}(t_{m1})[t_{m1}]^r = k_{m63} \quad (5.6)$$

Poređenjem koeficijenata na levim stranama jednačina (5.5) i (5.6) dobija se veza između Weibull-ovih eksponenata za vreme minimalnog napona i minimalni napon:

$$r = \frac{\delta_u}{\delta_t} \quad (5.7)$$

Izraz (5.7) je tačan samo ako su raspodele vremena minimalnog napona i minimalnog napona Weibull-ovog tipa. Posebno treba naglasiti da se jednačina (5.7) i prikazani model mogu koristiti samo ako η podjednako važi za sve kvantile [106].

5.3. Zakon uvećanja verovatnoće na sistemu fotonaponskih panela

Osnov funkcionisanja fotonaponske konverzije je u prevođenju elektrona (ili šupljine) iz valentne u provodnu zonu foton-fonon interakcijom. Ovaj proces, koji je osnova rada svake poluprovodničke diode je slučajne prirode i određen je statističkim raspodelama statičkih uzoraka slučajnih promenljivih koji u njemu učestvuju.

Međutim fotonaponski paneli se sastoje od jako velikog (skoro beskonačnog) broja dioda vezanih paralelno. Ispitivanje uzoraka fotonaponskih generatora (na pojedinačnim panelima) u laboratorijama nije dovoljno bez uzimanja u obzir efekata koji dovode do povećanja površine fotonaponskih panela (povezanih u fotonaponski generator). Ovaj problem je sličan problemu kada produžavamo trajanje rada fotonaponskih panela. Sa statističkog stanovišta ova pitanja se mogu rešiti upotrebom zakona uvećanja, koji predstavlja praktičnu primenu zakona množenja nezavisnih verovatnoća $P(A \cap B) = P(A)P(B)$. Naravno, pri tome se uzima međusobna nezavisnost fizičkih pojava koje se odvijaju u delovima celine fotonaponskog generatora [107].

Makroskopski posmatrano uvećanje površine i/ili pobude (upadnog fotonskog skupa) se manifestuje povećanjem iz bazne struje. Da bi se fotonaponski panel mogao tretirati kao izvor sa konstantnom strujom izlazni napon ne sme pasti ispod neke minimalne vrednosti.

Ako je verovatnoća da jedna komponenta fotonaponskog generatora (jedan panel ili slično...) imaju napon manji od minimalnog napona R_1 onda je komplementarni događaj da je napon te komponente veći od minimalne $1 - R_1$. Samim tim je verovatnoća da n puta uvećavana struktura ima napon veći od minimalnog [108]:

$$1 - p_n = (1 - p_1)_1 (1 - p_1)_2 \dots (1 - p_1)_n \quad (5.8)$$

a ako su sve posmatrane komponente strukture identične, tj.:

$$(1 - p_1)_1 = (1 - p_1)_2 \dots (1 - p_1)_n \quad (5.9)$$

dobija se:

$$p_n = 1 - (1 - p_1)^n \quad (5.8)$$

Ako se umesto diskretnih verovatnoća u obzir uzmu celokupne funkcije raspodele $F_1(x)$ i $F_n(x)$ tada je [109]:

$$F_n(x) = 1 - (1 - F_1(x))^n \quad (5.9)$$

Upotreba jednačine (5.8) je složenija. Naime, za upotrebu jednačine (5.9) potrebno je primeniti najpogodniju funkciju raspodele za statistički uzorak posmatrane slučajne promenljive.

Raspodele ekstremne vrednosti imaju matematički model koji se zasniva na zakonu uvećanja. Ukoliko se zakon uvećanja primenjuje na raspodele ekstremnih vrednosti, sa indentičnim elementima, tip raspodele se zadržava, i samo jedan parametar se menja. Ako se zakon uvećanja primenjuje na druge raspodele, tip raspodele se menja sa uvećanjem [109].

Ako se za indentične početne raspodele uzme Weibull-ova raspodela oblika:

$$F_1(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x - x_0}{\eta_1} \right)^\delta \right] \quad (5.10)$$

i zameni u zakon uvećanja (jednačina (7.9)) dobija se:

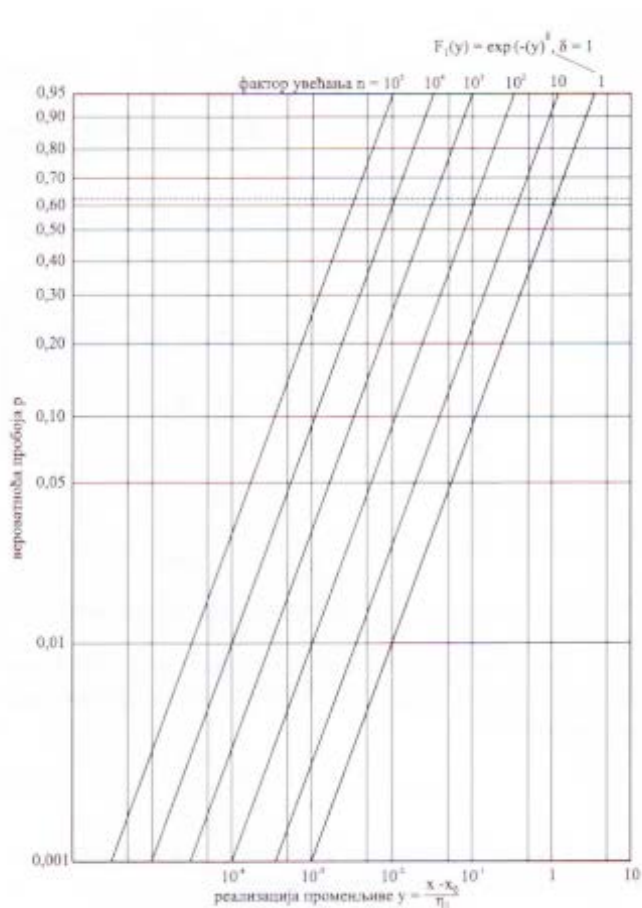
$$F_n = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x - x_0}{\eta_1} \right)^\delta n \right] \quad (5.11)$$

gde su: x_0 , η_1 i δ parametri početne raspodele. U slučaju povećanja za faktor n , samo se

63%-ni kvantila menja na:

$$\eta_n = (x_{1m} - x_0)n^{-1/\delta} \quad (5.12)$$

dok početna vrednost x_0 i Weibull-ov eksponent ostaju isti. Na papiru verovatnoće, funkcije raspodele koje su dobijene iz redukovane Weibull-ove raspodele ($\eta_1 = 1$, $x_0 = 0$) su paralelne sa početnom raspodelom $F_1(x)$ (slika 5.2) [110] .



Slika 5.2. Zakon uvećanja za Weibull-ovu raspodelu predstavljen na papiru verovatnoće (Weibull-ov papir) [110]

Na osnovu izraza (5.10) i (5.11) lako je izvesti drugi centralni momenat raspodela (tj. standardno odtupanje) kao:

$$S_i = \frac{\eta_1}{K(k)} \quad (5.13)$$

i prvi centralni momenat (tj. srednju vrednost):

$$\bar{V}_1 = V_0 S_1 \Gamma(1+k) K(k) \quad (5.14)$$

gde je $\Gamma(t)$ gama funkcija argumenta t i:

$$K(k) = [\Gamma(1+2k) - \Gamma^2(1+k)]^{-1/2} \quad (5.15)$$

odnosno:

$$\frac{Q_n}{n^k} = \frac{\eta_1}{n^k} \quad (5.16)$$

$$S_n = \frac{Q_n}{K(k)} = \frac{S_1}{n^k} \quad (5.17)$$

i:

$$\bar{V}_n = \bar{V}_1 - L(k) \left[1 - \frac{1}{n^k} \right] S_1 \quad (5.18)$$

gde je:

$$L(k) = \Gamma(1+k) K(k) \quad (5.19)$$

Koeficijent K nazivamo *Weibull*-ovim eksponentom i određuje se na osnovu eksperimentalnih rezultata [108,109,110].

Na osnovu istraživanja, može se zaključiti da algoritmi Zakona porasta i veka trajanja uz dobro kontrolisane eksperimentalne postupke male merne nesigurnosti, omogućavaju željeno uopštenje dobijenih rezultata i time donošenje zaključka u skladu sa određenim ciljem opravdanosti primene solarnih panela u punoj dimenziji objekta.

POGLAVLJE 6

ZAKLJUČAK

Eksperimentalno ispitivanje efikasnosti materijalizacije fasada na četiri karakteristična nisko-energetska objekta u Beogradu, je pokazala da moguće obezbediti dovoljno električne energije za normalno i komforno stanovanje uz izbegavanje neracionalne konverzije električne energije u toplotnu. Dugotrajna ispitivanja na eksperimentalnim objektima složenim automatizovanim mernim sistemom dala su rezultate koji precizno definišu efekte relevantnih parametara (bioklimatskih i geoklimatskih), na ukupnu električnu snagu koja se fotonaponskim solarnim panelima može dobiti u zavisnosti od godišnjeg doba. Rezultati su dobijeni modelom materijalizacije fasada objekata, a konačni kvantitativni zaključci su dobijeni na bazi statističkog povećanja dimenzije materijalizovane fasade sa integrisanim solarnim panelima. Kao što je rečeno, dobijeni rezultati su potvrdili mogućnost uštede primene integracije fotonaponskih sistema u fasadu objekta. Kako je fotonaponska konverzija energije ekološki preporučljiva, moglo se zaključiti da je ovakva materijalizacija fasada objekata preporučljiva. Međutim, tu se postavilo pitanje ekonomske isplativosti ovakvih sistema za snabdevanje električnom energijom (dopunskom ili u celosti).

Da bi se odgovorilo na ovo pitanje, na osnovu eksperimenata vršenih u razumnom roku, pribeglo se sofisticiranom metodom kontrolisanog ubrzavanja starenja fotonaponskih ćelija. Nakon što je laboratorijskim merenjima, pod dobro kontrolisanim uslovima uspostavljena jednoznačna korelacija između efekta stvarnog starenja i ubranog starenja, bilo je moguće proceniti ekonomsku isplativost integracije fotonaponskih sistema u materijalizaciju objekta. Nažalost, ustanovljeno je da je ovako dobijena električna energija, korisnicima oko četiri puta skuplja od energije koje mogu da preuzimaju iz niskonaponske distributivne mreže (koja je u urbanim sredinama svima dostupna). Naravno, to ne znači da treba odbaciti materijalizaciju fasada solarnim panelima u cilju poboljšanja kvaliteta života kako stanara objekta tako i uopšte. Naprotiv, dobijeni rezultati ukazuju da bi se objekti na kojima je izvršena materijalizacija fasada fotonaponskim panelima mogli šire koristiti i to dvosmerno. Odnosno, kada fotonaponski paneli proizvode više snage nego što objekat troši da se taj višak aktivne snage ubaci u niskonaponsku mrežu, a kada objekat troši veću snagu nego što integrisani sistem proizvodi, da se dodatna snaga preuzme iz niskonaponske distributivne mreže. Pri tome, treba ipak napomenuti da bi država subvencijama, ili na neki drugi način trebala da učestvuje u materijalizaciji objekata fotonaponskim sistemima, pošto se u današnjoj situaciji teško može očekivati da bi vlasnici objekata bili zainteresovani za investiranje u takvu materijalizaciju fasada.

Stručni i naučni rezultati prikazani u ovome radu imaju mogućnost primene u praksi. Tu treba posebno istaći metodu ubranog starenja fotonaponskih ćelija primenom radiativnog zračenja i metodu procene njihovog veka trajanja na osnovu krivih veka trajanja. Takav metodološki pristup omogućava predikciju eksploatacionog životnog veka

sistema napajanja objekata na osnovu, relativno, kratkotrajnih eksperimentalnih istraživanja. Ako se tu doda da primena zakona porasta verovatnoće omogućava da se ta ispitivanja izvedu na jednom znatno umanjenom sistemu napajanja stambenih objekata, može se zaključiti da prikazani postupak omogućava da se, u budućnosti, dolazi do podataka o efikasnosti i ekonomskoj isplativosti ovakvih sistema uz znatnu uštedu vremena i materijalnih sredstava.

Sam konačni rezultat sagleda se u tome da je primena fotonaponske konverzije energije na dopunsko snabdevanje stambenih objekata komercijalno isplativa samo uz politiku državnih subvencija i to ne treba shvatiti negativnim. Upravo suprotno, ovaj rezultat treba shvatiti kao podstrek za nastavak istraživanja u cilju poboljšanja efikasnosti solarnih ćelija u zavisnosti od ambijentalnih uslova primene i karakteristika objekta na koji se primenjuju. U tom smislu bi trebalo istraživati primenu drugih poluprovodničkih materijala za izradu solarnih ćelija i podloga za montiranje na stambene objekte koji bi mogli da povećaju efikasnost solarnih ćelija i smanje troškove njihove primene. Tu se kao moguće rešenje nameće primena poluprovodničkih materijala sa donorskim nivoima unutar zabranjene zone i reflektujućih površina kojim je solarna ćelija pričvršćena na stambeni objekat.

LITERATURA

- [1] Osmokrović, P., Knjiga postanja ili teorija velikog praska, Akademska misao, Beograd, 2013.
- [2] Matijašević-Obradović, J.D., Obradović, A.M., Ugrožavanje bezbednosti savremenog društva u svetlu ugrožavanje ekološke bezbednosti, monografska studija, Kultura polisa, god XI (2014), br.23, str.259-276.
- [3] Čović, A., Uticaj zagađenog vazduha na čoveka i klimatske promene, Godišnjak Fakulteta Pravnih Nauka, Godina 7, Broj 7, Banja Luka, jul 2017, pp. 251-259
- [4] Mikić, B.J., Upotreba obnovljivih izvora energije u funkciji zaštite životne sredine. Novi Sad: Univerzitet Privredna akademija u Novom Sadu-Fakultet za ekonomiju i inženjerski menadžment, (2018), Master rad
- [5] Bošković, J., Đurić, K., Tiranjanin, D., Sources of solar energy as factors of sustainable development, Ekonomija: teorija i praksa, 2017, vol. 10, iss. 4, pp. 49-64
- [6] Milićević, D., Marković, D., Nikolić, J., Lazarević, B., Radičević, A., et.al., Program energetske efikasnosti za period od. 2005-2018. godine, Kruševac, 2014.
- [7] Economic Policy Institute, <http://www.epia.org>
- [8] Solar Projekt, <http://solarprojekt.weebly.com/blog-o-energiji/solarna-energija>
- [9] Rajić, D., Kreativna ekologija, Beograd, 2016.
- [10] JP „Elektroprivreda Srbije“, Funkcionalni zahtevi i tehničke specifikacije AMI/MDM sistema, verzija 3.0, April 2014.
- [11] Milosavljević, D.D., Proučavanje energetske efikasnosti solarnih elektrana u Republici Srbiji i Republici Srpskoj, doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, Prirodno – matematički fakultet, Departman za fiziku, 2013.
- [12] STRATEGIJU RAZVOJA ENERGETIKE REPUBLIKE SRBIJE DO 2025. GODINE SA PROJEKCIJAMA DO 2030. GODINE, Narodna skupština Republike Srbije, na Sedmoj sednici Drugog redovnog zasjedanja u 2015. godini, održanoj 4. decembra 2015. god.
- [13] Miljković, Lj., Gijić, N., Đuričić, M., Energy efficiency – modern age imperative, 3rd International Conference "New Functional Materials and High Technology" NFMaHT-2015 29-30 June 2015, Tivat, Montenegro
- [14] Brnabić, A., Turković, M., Putokaz za razvoj obnovljivih izvora energije u Srbiji i okruženju, Centar za međunarodnu saradnju i održivi razvoj (CIRSD, Novembar 2015.
- [15] European Commission, *Energy Challenges and Policy-European Commission contribution to the European Council of 22 May 2013*, Study, May 2013.
- [16] Međunarodna agencija za energetiku (IEA), Energetske tehnološke perspektive, 2014
- [17] Climate action, environment, resource efficiency and raw materials HORIZON 2020, Research & Innovation Projects CALLS 2014 – 2017, 27/03/2018.
- [18] Connolly, D., Mathiesen, B.V., Lund, H., From a Heat Roadmap to an Energy System Roadmap, Smart Energy Europe, Aalborg Universitet, Denmark, 2015.
- [19] Hopke, J.E., Hestres, L.E., Fossil Fuel Divestment and Climate Change Communication, Oxford Encyclopedia of Climate Science, August 2017
- [20] Energy Technology Perspectives 2014, Harnessing Electricity's Potential, Executive Summary, International Energy Agency, 2014.
- [21] Protić, D.D., Critical Infrastructures: Threats, vulnerabilities and protection, MILITARY TECHNICAL COURIER, 2016., Vol 64, No 3., pp.812-837.
- [22] http://www.pvupscale.org/IMG/pdf/Planning_for_urban_scale_photovoltaic_systems.pdf
- [23] <http://www.iea-pvps.org/index.php?id=345>
- [24] PV UP-SCALE, www.50-solarsiedlungen.de

- [25] IEA-PVPS-Task 10 Community-Scale PV: Real Examples of PV Based Housing and Public Developments, www.pvupscale.org
- [26] IEA-PVPS-Task 10 Community-Scale PV: Real Examples of PV Based Housing and Public Developments, www.pvupscale.org
- [27] Godišnji izveštaj EPS-a za 2017 i 2018. godinu
- [28] Pucar,M.,Nenković-Riznić,M.,Prostorni, ekološki, energetski i društveni aspekti razvoja naselja i klimatske promene, Institut za arhitekturu i urbanizam Srbije (IAUS) Monografija,Posebna izdanja br. 78, Beograd, 2016.
- [29] Jovanović, N., Principi bioklimatske arhitekture i pasivnih solarnih sistema na primeru stambenog objekta na brdu Vinik, Nauka + Praksa, *Časopis Instituta za građevinarstvo i arhitekturu Građevinsko-arhitektonskog fakulteta Univerziteta u Nišu*, Broj 16, 2013, pp. 29-34
- [30] Lim,K.T., Lee,D., Park,K., Kim,G.,et.al., Development of P-on-N silicon photomultiplier prototype for blue light detection, 19th International Workshop on Radiation Imaging Detectors (IWORID2017), Journal of Instrumentation, Volume 12, November 2017.
- [31] Knežević, Ivan D., Radijaciona otpornost rezistivnih postojanih memorija, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu Elektrotehnički fakultet, 2013.
- [32] Kamio, Yuji, Développement d'un nouveau critère pour déterminer les limites d'utilisation des détecteurs en dosimétrie non standard, Université de Montréal, Département de physique Faculté des arts et des sciences, Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures en vue de l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.) en physique, 5 février 2014.,
- [33] Madbouly,A.M., Attam,E.R.,Comparative Study between Lead Oxide and Lead Nitrate Polymer as Gamma-Radiation Shielding Materials, Egyptian Nuclear and Radiological Regulatory Authority, Cairo, Egypt, Journal of Environmental Protection, 2016, 7, 268-276
- [34] Husain,H.S., Rasheed Naji,N.A., Mahmood,B.M., Investigation of Gamma Ray Shielding by Polymer Composites, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 454, Number1, 2018., 012131.
- [35] Nikolić,D., Vasić-Milovanović,A., Obrenović,M., Dolićanin,E., Effects of successive gamma and neutron irradiation on solar cells, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Vol. 17, No. 3-4, March – April 2015, pp. 351 - 356
- [36] Nikolić,D., Vasić-Milovanović,A., The Impact of Successive Gamma and Neutron Irradiation on Characteristics of PIN Photodiodes and Phototransistors, Radiation Effects in Materials, books.google.com, IntechOpen, 2016, pp.69-92
- [37] Anastasiadis,A., Papaioannou,A., Sandberg, I., Georgoulis,M., et.al., Predicting Flares and Solar Energetic Particle Events: The FORSPEF Tool, Solar Phys (2017), 292:134
- [38] Ilyas,S., Jaber,N.,Younis,M.I., MEMS Logic Using Mixed-Frequency Excitation, Physical Sciences Division, King Abdullah University of Science and Technology, Thuwal, Saudi Arabia, Journal of Microelectromechanical Systems (Volume: 26 , Issue 5 , Oct. 2017), 1140 - 1146
- [39] Campajola,L., Di Capua,F., Applications of Accelerators and Radiation Sources in the Field of Space Research and Industry, Applications of Radiation Chemistry in the Fields of Industry, Biotechnology and Environment, pp.269-297
- [40] Chintala,K.M., Panchal,S.,Rana,P.,Chauhan,R.P.,Structural, optical and electrical properties of gamma-rays exposed selenium nanowires, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, August 2016, Volume 27, Issue 8, pp 8087–8093
- [41] Nikolić,D.S., Uticaj sukcesivnog ozračivanja fotonaponskih detektora gama i neutronske zračenjem na njihove karakteristike, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet ,2015
- [42] Purenović,J., Svojstva i primena multifunkcionalne mikrolegirane kompozitne aluminosilikatne keramike kao aktivnog dielektrika sa nanostrukturnim metalnim filmovima na amorfnom kristalnoj matrici uz fraktalnu prirodu granice zrna, monografija, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Izdavač Institut za nuklearne nauke Vinča,2016

- [43] Scharf,C.,Radiation damage of highly irradiated silicon sensors, Dissertation, des Department Physik der Universität Hamburg,2018.
- [44] Hartmann Frank, Evolution of Silicon Sensor Technology in Particle Physics, Second Edition, Springer Tracts in Modern Physics, Karlsruhe Institute of Technology (KIT) Eggenstein-Leopoldshafen Germany, Springer International Publishing AG 2017,volume 275
- [45] Feindt Finn, Edge-TCT for the Investigation of Radiation Damaged Silicon Strip Sensors, Master-Arbeit im Studiengang Physik ,Universität Hamburg ,2016
- [46] Kopsalis,I.,Surface effects in segmented silicon sensors, Dissertation, Fachbereich Physik der Universität Hamburg,2017.
- [47] Vukadinov, A.V., Radosavljević, V.M, Protić, M.Z., Ristić, D.P., Mere za poboljšanje energetske efikasnosti zgrada, Tehnika, 2015, Volumen 70, br. 3., str. 409-414.
- [48] Mohammed, S.A., Hashim, E.T., Designing a Maximum Power Point Tracking System for a Monocrystalline Silcion Solar Module Using the Arduino Microcontroller and Synchronous Buck Converter, *FME Transactions*, Vol.47, No.3., 2019, pp.524-533.
- [49] Mohd Shariff, N.S., Mohamad Saad, P.S.M., Halim Affendi,I.H., et.al., Thickness and concentration effect of P3HT in P3HT:graphene nanocomposites based bulk-heterojunction organic solar cells, AIP Conference Proceedings 1733, 020052 (2016).
- [50] Vengatesh, R.P., Rajan, S.E., Investigation of the effects of homogeneous and heterogeneous solar irradiations on multicystal PV module under various configurations, *IET Renewable Power Generation*, Volume 9, Issue 3, April 2015., pp.245-254.
- [51] Priolo, F., Gregorkiewicz, T.,Galli, M., Krauss, T.F., Silicon nanostructures for photonics and photovoltaics, *Nature Nanotechnology* volume9, (2014), pp.19–32.
- [52] Farrakhov, B.F., Fattakhov, Ya.V.,Galyautdinov, M.F., An Optical Diffraction Method for Controlling the Solid-Phase Recrystallization and Heating of Implanted Semiconductors during Pulse Light Annealing, *Instruments and Experimental Tehniques*, April 2019, Volume 62, Issue 2, pp.226-231.
- [53] Sulyok,G., Summhammer, J., Extraction of a photovoltaic cell's double-diode model parameters from data sheet values, *Energy Science & Engineering*, 23 July 2018., <https://doi.org/10.1002/ese3.216>
- [54] Das,N., Pal,N.,Thermal Impact on LED based Solar PV Cell, IEEE Conference Publishing, Department of Electrical Engg, Indian School of Mines (under MHRD, Govt of India) Dhanbad,2014
- [55] Grgur,Branimir N., Osnovni principi i primena fotoelektrohemijskih reakcija, Naučni rad, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, Srbija, Osnovni principi i primena fotoelektrohemijskih reakcija, Zaštita Materijala (2016), 57 (1) ,93 - 100
- [56] Tasić, Nikola B., Sinteza i procesiranje nanostrukturnog titan (IV)-oksida za primenu u solarnim ćelijama sa fotoosetljivom bojom, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu Tehnološko-metalurški fakultet,Beograd 2017.
- [57] Colins,K., Liu,Y., Li,L., Birdee,K., Radiation-Induced Damage–Based System and Method for Indirectly Monitoring High-Dose Ionizing Radiation, *Journal Nuclar Technology*, Volume 201, 2018., Issue 2, pp.113-121
- [58] Iniewski, K., Radiation Effects in Semiconductors, Engineering & Technology, CMOS Emerging Technologies Inc., Vancouver, British Columbia, Canada, 3 September 2018, Pub. location:Boca Raton, Imprint:CRC Press, eBook: ISBN 9781315217864
- [59] Donegani, Elena Maria, Energy-dependent proton damage in silicon, Dissertation, der Universität Hamburg, 2017
- [60] Ferry, David K., Semiconductor Transport, Engineering & Technology, Physical Sciences, eBook Published: 12 August 2016, Pub. location: London, Imprint: CRC Press, eBook ISBN 9781315267548
- [61] Cressler, John D., Measurement and Modeling of Silicon Heterostructure Devices, Engineering & Technology, eBook Published3 October 2018 Pub. location:Boca Raton,Imprint: CRC Press, eBook ISBN 9781315218878

- [62] Mendicino Roberto, Development of 3D Silicon radiation detectors for neutrons and high energy charged particles, Università degli Studi di Trento, March 2017
- [63] Bisquert Juan, The Physics of Solar Cells Perovskites, Organics, and Photovoltaic Fundamentals, Universitat Jaume I, Castello, Spain, Engineering & Technology, Physical Sciences, Journals Taylor & Francis Online, eBook Published: 15 November 2017, Pub. location: Boca Raton, Imprint: CRC Press, eBook: ISBN 9781138305243
- [64] Todorović, R., Prediction of vacuum circuit breakers' insulating characteristics based on the examination of pre-breakdown phenomena, National Repository of Dissertation in Serbia, Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet, 08.04.2016.
- [65] Vuković, D., Šetrajčić, J.P., Vučenović, S.M., Uticaj tankih prevlaka na povećanje efikasnosti fotonaponske konverzije, *Naučno-stručni simpozijum Energetska efikasnost | ENEF 2017*, pp. 106-109, Banja Luka, 3-4. novembar 2017. godine
- [66] Zhang, Q., Suzuki, K., Miura, H., et.al., Strain-induced Change of Electronic Band Structure of Dumbbell-Shape Graphene Nanoribbon, IEEE *Xplore* Digital Library, 07 March 2019.
- [67] Ho, S.M., Raman Investigations of Metal Chalcogenide Thin Films, *Oriental Journal of Chemistry*, 35. 2019.
- [68] Ham, S.S, Kom, C.H., Choi, S.H., Lee, J.H., et.al., Jig-free laser welding of Eagle XG glasses by using a picosecond pulsed laser, *Journal of Mechanical Science and Technology*, June 2019., Volume 33, Issue 6, pp. 2825-2832.
- [69] Hu, F., Zhao, Q., Peng, X., Improved model on fluorescence decay in singlet fission materials, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 02 January 2019., 21, Issue 4, pp. 2153-2165
- [70] Vengatesh, R.P., Rajan, E.S., Analysis of PV module connected in different configurations under uniform and non-uniform solar radiations, *International Journal of Green Energy*, 18 July 2016., pp.1507-1516.
- [71] Polman, A., Atwater, H.A., Photonic design principles for ultrahigh-efficiency photovoltaics, *Nature Materials* 11, 2012., pp.174-177.
- [72] Maniam, S., Munirah, W.S.H., Wong, H.Y., Zaman, M., Investigation on the Fabrication Process of Copper, Zinc, Tin and Sulphur on Molybdenum as Back Contact for Microwire Solar Cell, *Asian Journal of Scientific Research*, Volume 12 (1), 2019, pp.65-70.
- [73] Sabah, Nassir H., Electronics Basic, Analog, and Digital with Pspice, Engineering & Technology, Journals Taylor & Francis Online, eBook Published: 19 December 2017, Pub. location: Boca Raton, Imprint: CRC Press, eBook: ISBN 9781315218601
- [74] Rozanov, Y., Ryvkin, S.E., Chaplygin, E., Voronin, P., Power Electronics Basics, Operating Principles, Design, Formulas, and Applications, Engineering & Technology, Journals Taylor & Francis Online, eBook Published: 23 April 2015, Pub. location: Boca Raton, Imprint: CRC Press, eBook: ISBN 9780429179068
- [75] Al-Hossainy, A.F., Zoromba, M.Sh., Abdel-Aziz, M.H., Bassyoni, M., et.al., Fabrication of heterojunction diode using doped-poly (ortho-aminophenol) for solar cells applications, *Physica B: Condensed Matter*, Volume 566, pp.6-16, Elsevier, 1. August 2019.
- [76] Vasić, A., Zdravković, M., Vujisić, M., Stanković, K., Osmokrović, Temperature dependence of solar cell characteristics through frequency noise level and ideality factor measurements, *Journal of Microelectronics, Electronic Components and Materials*, Vol. 42, No. 2 (2012), pp.98 – 103.
- [77] Al-Hossainy, A.F., Zoromba, M.Sh., Abdel-Aziz, M.H., Bassyoni, M., et.al., Fabrication of heterojunction diode using doped-poly (ortho-aminophenol) for solar cells applications, *Physica B: Condensed Matter*, Volume 566, pp.6-16, Elsevier, 1. August 2019.
- [78] Guerrero, A., Juarez-Perez, E.J., Bisquert, J., et.al., Electrical field profile and doping in planar lead halide perovskite solar cells, *Appl. Phys. Lett.* 105, Issue 13, 133902 (2014).
- [79] Manirul Hakue, S.K., Ardila-Rey, J.A., Umar, Y., Rahman, H., et.al., Polymeric Materials for Conversion of Electromagnetic Waves from the Sun to Electric Power, *Polymers*

(Basel), Volume 10 (3), 12. March 2018, pp.307.

- [80] Tress, W., Marinova, N., Moehl, T., et.al., Understanding the rate-dependent J -V hysteresis, slow time component, and aging in $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ perovskite solar cells: the role of a compensated electric field, *Energy and Environmental Science*, 05 January 2015., Volume 8, Issue 3, pp.995-1004.
- [81] Lang, F., Shargaieva, O., Brus, B.B., et.al., Influence of Radiation on the Properties and the Stability of Hybrid Perovskites, 20 November 2017., *Advanced Materials*, Volume 30, Issue 3, 10.1002.
- [82] Orak, I., Kocyigit, A., Karatas, S., The Analysis of the Electrical and Photovoltaic Properties of Cr/p-Si Structures Using Current-Voltage Measurements, *Silicon*, September 2018, Volume 10, Issue 5, pp.2109–2116.
- [83] Yun-Yan, L., Song, P., Fei, W., Yang, W., Photocarrier radiometry for noncontact evaluation of space monocrystalline silicon solar cell under low-energy electron irradiation, *Chinese Physics B*, 10 July 2015., Volume 24, Number 9, pp. 097801.
- [84] Fulay, P., Lee, J.-K., Electronic, Magnetic, and Optical Materials, Engineering & Technology, Physical Sciences, Journals Taylor & Francis Online, eBook Published: 18 November 2016, Pub. location: Boca Raton, Imprint: CRC Press, eBook: ISBN 9781315371870
- [85] Ferrero, M., Arcidiacono, R., Barozzi, M., Boscardin, M., Cartiglia, N., et.al., Radiation resistant LGAD design, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Volume 919, 1th March 2019, Elsevier, pp.16-26.
- [86] Biskup Till, Structure–Function Relationship of Organic Semiconductors: Detailed Insights From Time-Resolved EPR Spectroscopy, *Institute of Physical Chemistry, University of Freiburg, Freiburg, Germany, Front Chem*, 2019, 7:10.
- [87] Alamdari, S., Ghamsari, M.S., Afarideh, H., Mohammadi, A., et.al., Preparation and characterization of GO-ZnO nanocomposite for UV detection application, *Optical Materials*, Volume 92, pp. 243-250, Elsevier, June 2019.
- [88] Ivanovski, Valentin., *Investigation of the structure and hyperfine interactions in the intermetallic γ -Ni₃Al phase doped with hafnium and iron*, dissertation, UNIVERSITY OF BELGRADE FACULTY OF PHYSICS, 2015.
- [89] Nikolić, D., Vasić-Milovanović, A., The Impact of Successive Gamma and Neutron Irradiation on Characteristics of PIN Photodiodes and Phototransistors, *Radiation Effects in Materials*, Chapter 3, 20th July 2016., INTENCH, pp.69-92.
- [90] Parida, M.K., Sundari, S.T., Sathiamoorthy, V., Sivakumar, S., Current–voltage characteristics of silicon PIN diodes irradiated in KAMINI nuclear reactor, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Volume 905, 11 October 2018, Elsevier, pp.129-137.
- [91] Ravotti, F., Dosimetry Techniques and Radiation Test Facilities for Total Ionizing Dose Testing, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Volume: 65, Issue: 8, Aug. 2018, pp. 1440 – 1464.
- [92] Conings, B., Drijkoningen, J., Gauquelin, N., et.al., Intrinsic Thermal Instability of Methylammonium Lead Trihalide Perovskite, *Advanced Energy Materials*, 05 August 2015., Volume 5, Issue 15, pp.1500477.
- [93] Petit Didier, *Etude de l'influence de stress électriques et d'irradiations neutroniques sur des HEMTs de la filière GaN*, Thèse de doctorat en Electronique, microelectronique, optique et lasers, optoelectronique microondes, 05.01.2017., Universite de Caen Normandie.
- [94] Nikolić, D., Vasić-Milovanović, A., Comparative Study of Gamma and Neutron Irradiation Effects on the Silicon Solar Cells Parameters, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, FME Transactions (2016) volume 44, no.1, pp. 99-105
- [95] Correa-Baena, J.P., Abate, A., Saliba, M., et.al., The rapid evolution of highly efficient

- perovskite solar cells, *Energy and Environmental Science*, 09 February 2017., Volume 10, Issue 3, pp.710-727.
- [96] Jayaramaiah, J.R., Lakshminarasappa, B.N., Nagabhushana, K.R., Luminescence performance of europium-doped yttrium oxide thin films, *Journal of Luminescence*, Volume 157, January 2015., pp.63-68.
 - [97] Spasojević-Brkić, V.K., Klarin, M.M., Brkić, A.Đ., Ergonomic design of crane cabin interior: The path to improved safety, *Safety Science, Elsevier*, Volume 73, March 2015, pp.43-51.
 - [98] Bara, S., Rodriguez-Aros, A., Perez, M., et.al., Estimating the relative contribution of streetlights, vehicles, and residential lighting to the urban night sky brightness, *Lighting Research and Technology*, 29 October 2018., doi.org.10.1177.
 - [99] Nelson, George Thomas IV, Native and Radiation-Induced defects in III-V Solar Cells and Photodiodes, (2019), Thesis, Rochester Institute of Technology.
 - [100] Gibson, S.J., Van Kasteren, B., Tekcan, B., Cui, Y., et.al., Tapered InP nanowire arrays for efficient broadband high-speed single-photon detection, *Nature Nanotechnology* 14, pp.473–479, 04. March 2019.
 - [101] Gholipour, B., Piccinotti, D., Karvounis, A., MacDonald, K.F., and Zheludev, N.I., Reconfigurable Ultraviolet and High-Energy Visible Dielectric Metamaterials, *Nano Lett.*, 2019, 19, 3, pp.1643-1648, ASC Publications, 5th February 2019.
 - [102] <http://www.hidmet.gov.rs/>
 - [103] <https://www.meteoblue.com/sr/>
 - [104] Feng, L., Wang, S., Li, Y., et.al., Opposite change trend of electrical behavior curves near the threshold between GaAs- and GaN-multi-quantum-well laser diodes, *Applied Physics B*, 9 February 2018, 124, 39, Online ISSN 1432-0649
 - [105] Zhang, T., Raynaud, C., Planson, D., Measure and analysis of 4H-SiC Schottky barrier height with Mo contacts, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 85, 10102 (2019), Number of pages 9.
 - [106] Han, D.P., Kim, Y.J., Shim, J.I. Shin, D.S., Forward-Capacitance Measurement on Wide-Bandgap Light-Emitting Diodes, *IEEE Photonics Technology letters*. Volume 28, Issue 21, pp. 2407 – 2410, (2016)
 - [107] Feng, M.X., Liu, J.P., Zhang, S.M., et.al., Saturation of the junction voltage in GaN-based laser diodes, *Applied Physics Letters*, Volume 102, 183509, (2013)
 - [108] Bansal, K., Henini, M., Alshammari, M.S., Dynamics of electronic transitions and frequency dependence of negative capacitance in semiconductor diodes under high forward bias, *Applied Physics Letters*, Volume 105, 123503 (2014).
 - [109] Feng, L., Wang, S., Li, Y., et.al., Exciton recombination in lasing contributing an opposite abrupt change of the electrical behavior near threshold between GaN- and GaAs- multi-quantum-well laser diodes, *Journal of Physics D, Applied Physics*, 9 February 2018, Volume 51, Number 9, 095102.
 - [110] Huang, W.-C., Lin, T.-C., Horng, C.-T., Li, Y.-H., The electrical characteristics of Ni/n-GaSb Schottky diode, *ELSEVIER, Materials Science of Semiconductor Processing*, Volume 16, Issue 2, April 2013., pp.418-423.
 - [111] Nanaki, E.A., Xydis, G., Energetic Aspects of Renewable Energy Systems, Insights to Transportation and Energy Sector for Intelligent Communities, Engineering & Technology, Environment & Agriculture, Journals Taylor & Francis Online, eBook Published: 31 July 2019, Pub. location: Boca Raton, Imprint: CRC Press, eBook: 9781315109756
 - [112] Greco, G., Giannazzo, F., Roccaforte, F., Temperature dependent forward current-voltage characteristics of Ni/Au Schottky contacts on AlGaIn/GaN heterostructures described by a two diodes model, *Journal of Applied Physics*, Volume 121, Issue 4, 045701, (2017).
 - [113] Werner, S., Lohmüller, E., Wolf, A., Clement, F., Extending the limits of screen-printed metallization of phosphorus- and boron-doped surfaces, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 158, Part 1, December 2016, pp.37-42.
 - [114] Nowakowski, K., Van Bremen, R., Zandvliet, H.J.W., Control of the metal/WS₂ contact properties using 2-dimensional buffer layers, *Nanoscale*, (2019.), Issue 12.

- [115] Dolmatov, O.Y., Stepanov, I.B., Liventsov, N., Advantages of Thorium Nuclear Fuel for Thermal-Neutron Reactors, *Advanced Materials Research*, January 2015., Volume 1084, pp.275-279.
- [116] Ghanta, U., Singh, S., Ray, M., et.al., Electrical transport through array of electrochemically etched silicon nanorods, *PSS a applications and materials science*, Volume 214, Issue 6, April 2017, Wiley Online Library.
- [117] Nicholls, J., Dimitrijević, S., Tanner, R., Han, J., The Role of Near-Interface Traps in Modulating the Barrier Height of SiC Schottky Diodes, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Volume 66, Issue 4, 2019, pp. 1675-1700.
- [118] Park, S.M., Mazza, S.M., Liang, Z., et.al., Processing Dependent Influence of the Hole Transport Layer Ionization Energy on Methylammonium Lead Iodide Perovskite Photovoltaics *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018., 2018101815548-15557,
- [119] Schuss, C., Remes, K., Leppanen, K., Saarela, J., Fabritius, T., Eichberger, B., et.al., Detecting Defects in Photovoltaic Panels With the Help of Synchronized Thermography, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Volume 67, Issue 5, 2018, pp. 1178-1186.
- [120] Marstell, Roderick James, Impact of Chemistry and Processing of Atomic Layer Deposited Dielectrics on Silicon, Theses and Dissertations. 4358., 2018., Lehigh University.
- [121] Løvvik, O.M., Diplas, S., Romanyuk, A., Ulyashin, A., Initial stages of ITO/Si interface formation: In situ x-ray photoelectron spectroscopy measurements upon magnetron sputtering and atomistic modelling using density functional theory, *J. Appl. Phys.* 115, 083705 (2014), Number of pages 7.
- [122] Al-Muntaser, El-Nahass, M.M., Oraby, A.H., Meikhail, M.S., Zeyada H.M., Fabrication and transport mechanisms of 5,10,15,20-tetraphenyl-21H,23H- porphrine manganese(III) chloride/n-type silicon heterojunction solar cell, *Journal of Materials Science*, July 2018, Volume 29, Issue 13, pp 10911–10920
- [123] Anitha, R., Vavilapalli, D.S., Menon, S.S., et.al., Hybrid gallium nitride/organic heterojunction with improved electrical properties for optoelectronic applications, *Electronic materials*, *Journal of Materials Science*, August 2018, Volume 53, Issue 16, pp. 11553–11561.
- [124] Mao, P., Wei, Y., Li, H., Wang, J., Junction diodes in organic solar cells, *Nano Energy*, Volume 41, November 2017, pp.717-730.
- [125] Yigiterol, F., Gullu, H.H., Yildiz, E.D., Influence of Si₃N₄/Si₃N₄ layer on the electrical properties of Au/n-4H SiC diodes, *Bulletin of Materials Science*, June 2018, 41:66
- [126] Yushchenko, A. Yu., Ayzenshtat, I., Fedotova, F. I., Schottky Diodes on Heterostructures with Two-Dimensional Electron Gas, *Russian Physics Journal*, April 2019, Volume 61, Issue 12, pp. 2159–2166.
- [127] Armstrong, A.M., Crawford, M.H., Jayawardena, A., Ahyi, A., Dhar, S., Role of self-trapped holes in the photoconductive gain of β -gallium oxide Schottky diodes, *Journal of Applied Physics*, 119, 103102 (2016).
- [128] Lin, S., Lu, Y., Feng, S., Hao, Z., Yan, Y., A High Current Density Direct-Current Generator Based on a Moving van der Waals Schottky Diode, *Advanced Materials*, Volume 31, Issue 7, 15 February 2019., 1804398.
- [129] Karabulut, A., Barrier height modification in Au/Ti/n-GaAs devices with a HfO₂/HfO₂ interfacial layer formed by atomic layer deposition, *Bulletin of Materials Science*, February 2019, 42:5.
- [130] Badwawi, R.A., Abusara, M., Mallick, T., A Review of Hybrid Solar PV and Wind Energy System, *Smart Science*, Volume 3, 2015., Issue 3, pp.127-138.
- [131] Wang, Y., GaN Based Schottky Diode, Disruptive Wide Bandgap Semiconductors, Related Technologies, and Their Applications, 12 September 2018.
- [132] Moothy, J.K., OPTIMAL SIZING OF HYBRID DIESEL ENGINE – PHOTOVOLTAIC AND BATTERY SYSTEM FOR A MARINE VESSEL APPLICATION, Universiti Technology Malaysia, January 2018.
- [133] Nikolić, D.S., Vasić, A.I., Lazarević, Đ.R., Obrenović, M.D., Improvement Possibilities of the I-V Characteristics of Pin Photodiodes Damaged By Gamma Irradiation, Nuclear technology and radiation protection, 2013, 28, 1, pp. 84-91

- [134] Untila, G.G., Kost, T.N., Chebotareva, A.B., Bifacial 8.3%/5.4% front/rear efficiency ZnO:Al/n-Si heterojunction solar cell produced by spray pyrolysis, *Solar Energy*, Volume 127, April 2016, pp.184-187.
- [135] Kumar, P., Arif, W., Bhowmick, B, Scaling of Dopant Segregation Schottky Barrier Using Metal Strip Buried Oxide MOSFET and its Comparison with Conventional Device, *Silicon*, Volume 10, Issue 3, May 2018, pp.811-820.
- [136] Tiwari, G., Kupfer, R., Jiao, X., Gradient Magnet Design for Simultaneous Detection of Electrons and Positrons in the Intermediate MeV Range, Charged-Particle Optics, Gamma-ray Spectroscopy, Instrumentation and Detectors (physics.ins-det), 2019., ArXiv:1904.03143.
- [137] Yildirim, N, Turut, A., Dogan, H., Current-Voltage Characteristics of Thermally Annealed Ni/n-GaAs Schottky Contacts, *Surface Review and Letters*, Volume 25, No.4.,1850082, (2018).
- [138] Osvald, J., On the Effective Barrier Height in Inhomogeneous Schottky Diodes, 12th *International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems (ASDAM)*, IEEE (2018).
- [139] Yusof, A.R.B.M., Gao, P., Nazeeruddin, M.K., Recent progress in organohalide lead perovskites for photovoltaic and optoelectronic applications, *Coordination Chemistry Reviews*, ELSEVIER, Volume 373, 15th October 2018, pp.258-294.
- [140] Tan, S.O., The Analysis of The Researches on Metal-Semiconductor Structures with and without Interfacial Layer in Turkey, *Hittite Journal of Science & Engineering*, Volume 6, No.1, (2019), pp.51-56.
- [141] Belgacem, C.H., Determination of Commercial Silicon Diode (4007IN) Parameters from the I-V and P-V Characteristics, *Silicon*, Volume 10, Issue 4, July 2018, pp. 1469-1474.
- [142] Myers Daryl R., Solar Radiation: Practical Modeling for Renewable Energy Applications, Engineering & Technology, Journals Taylor &Francis Online, eBook Published: 12 July 2017, Pub. location: Boca Raton, Imprint: CRC Press, eBook: ISBN 9781315216584
- [143] Kumar Pankaj, Organic solar cells, Device Physics, Processing, Degradation, and Prevention, Engineering & Technology, Physical Sciences , Journals Taylor &Francis Online ,eBook Published3: October 2016, Pub. location: Boca Raton, Imprint: CRC Press, eBook ISBN: 9781315370774
- [144] Nanaki,E.A., Xydis,G., Exergetic Aspects of Renewable Energy Systems, Insights to Transportation and Energy Sector for Intelligent Communities, Engineering & Technology, Environment & Agriculture, Journals Taylor &Francis Online, eBook Published: 31 July 2019, Pub. location: Boca Raton, Imprint: CRC Press, eBook: 9781315109756
- [145] Luo,F.L.,Ye,H., Renewable Energy Systems, Advanced Conversion Technologies and Applications, , Engineering & Technology, Journals Taylor &Francis Online, eBook Published: 19 December 2017, Pub.location: Boca Raton, Imprint: CRC Press, eBook: ISBN 9781315216713
- [146] Popov Anatoly, Disordered Semiconductors, Physics and Applications Second Edition , Engineering & Technology, Physical Sciences, Journals Taylor &Francis Online, eBook Published: 1 August 2018, Pub. location: New York, Imprint: Jenny Stanford Publishing, eBook ISBN: 9780429225352

POPIS SLIKA I TABELA

LISTA SLIKA

- Slika 2.1. Zgrada „Köln, Börnerstraße“ (LEG)
- Slika 2.2. Montaža solarnih FN modula na fasadi zgrade (LEG)
- Slika 2.3. Kolor fotonaponske instalacije na zgradi (ASG)
- Slika 2.4. Solarni fotonaponski sistem instalirani na krovove kuća, stambenog kompleksa „Pal Town Josai-no-Mori“, u Ota City, Gunma Prefektura, u Japanu
- Slika 2.5. FN solarni sistem instaliran na fasade zgrada okruga La Darnaise, Francuska
- Slika 2.6. Primer Situacionog plana sa najpovoljnijim oblikom lokacije, brdo Vinik, u blizini grada Niša, RSrbija
- Slika 2.7. Presek objekta, uklapanje objekta u teren terasastim rasporedom masa i ukopavanjem, brdo Vinik, u blizini grada Niša, RSrbija
- Slika 2.8. Prikaz severne strane objekta koja je u potpunosti ukopana u teren i delimično pokrivena zelenim krovom, kuća na brdu Vinik, u blizini grada Niša, RSrbija
- Slika 2.9. Prikaz zaštite objekta od preteranog osunčanja u letnjem periodu putem listopadne vegetacije, kuća na brdu Vinik, u blizini grada Niša, RSrbija
- Slika 2.10. Prikaz zaštite objekta od vetra zimzelenom vegetacijom tokom zime i osunčanja južnih prostorija, kuća na brdu Vinik, u blizini grada Niša, RSrbija
- Slika 3.1. Kristalna struktura silicijuma
- Slika 3.2. Šema monokristalne silicijumske solarne ćelije: 1) anoda (hladna elektroda), 2) katoda (usijana elektroda), 3) sloj za smanjenje refleksije svetlosti
- Slika 3.3. Uprošćena šema osvetljene N^+ -P solarne ćelije i dijagrami energetske zone: a) u kratkom spoju i b) sa potrošačem
- Slika 3.4. Monokristalna (c-Si) solarne ćelije: a) tipičan izgled prednje kontaktne strukture, b) poprečni presek
- Slika 3.5. Ekvivalentno električno kolo koje odgovara realnoj solarne ćeliji
- Slika 3.6. Teorijska I-V karakteristika solarnih ćelija sa uračunatom rednom R_s i paralelnom otpornošću R_{sh}
- Slika 3.7. Teorijska zavisnost gustine struje kratkog spoja od faktora idealnosti
- Slika 3.8. Simulacija zavisnosti P-V karakteristika od faktora idealnosti
- Slika 3.9. Strujno-naponska karakteristika solarne ćelije u mraku i pri osvetljenju
- Slika 3.10. Proces rekombinacije u solarne ćeliji
- Slika 3.11. Koncentrisani solarni (CPV) sistem
- Slika 4.1. Prvi Objekat, Opština Rakovica
- Slika 4.2. Drugi Objekat, gradsko naselje Krnjača, Opština Palilula
- Slika 4.3. Treći Objekat, gradsko naselje Krnjača, Opština Palilula

- Slika 4.4. Četvrti Objekat, Opština Obrenovac
- Slika 4.5. Simulacija FN solarnih panela na fasade Objekata-prvi, drugi, treći, četvrti objekat, (objekti su poredani redom odozgo na dole: Prvi Objekat, Drugi Objekat, Treći Objekat, Četvrti Objekat (Prilog 3).
- Slika 4.6. Prosečne temperature i padavine: u opštini Rakovica, naselju Krnjača, opštini Obrenovac
- Slika 4.7. Maksimalne temperature: u opštini Rakovica, naselju Krnjača, u opštini Obrenovac
- Slika 4.8. Mesečne vrednosti sunčanih, poluoblačnih, oblačnih i kišnih dana u opštini Rakovica, naselju Krnjača, u opštini Obrenovac
- Slika 4.9. Ruža vetrova u opštini Rakovica, naselju Krnjača, u opštini Obrenovac
- Slika 4.10 Brzina vetra u opštini Rakovica, naselju Krnjača, u opštini Obrenovac
- Slika 4.11. Snimljene P-V karakteristike u toku godišnjih doba na Objektima (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), uz konfiguraciju panela na krovu kuća: 1-leto, 22.06.2018.; 2-proleće, 25.03.2018.; 3-zima, 22.12.2017.; 4-jesen, 22.09.2017.
- Slika 4.12. Snimljene P-V karakteristike u toku godišnjih doba na Objektima (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), uz konfiguraciju panela na fasadama kuća: 1-leto, 22.06.2018.; 2-proleće, 25.03.2018.; 3-zima, 22.12.2017.; 4-jesen, 22.09.2017.
- Slika 4.13. Snimljene P-V karakteristike u toku godišnjih doba na Objektima (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), uz konfiguraciju panela na krovovima zajedno sa stiroporom: 1-leto, 22.06.2018.; 2-proleće, 25.03.2018.; 3-zima, 22.12.2017.; 4-jesen, 22.09.2017.
- Slika 4.14. Snimljene P-V karakteristike u toku godišnjih doba na Objektima (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), uz konfiguraciju panela na fasadama zajedno sa stiroporom: 1-leto, 22.06.2018.; 2-proleće, 25.03.2018.; 3-zima, 22.12.2017.; 4-jesen, 22.09.2017.
- Slika 4.15. Dnevna kriva promene snage $P[W]$, monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela pri otvorenim kontaktima temperature za Objekte (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), FN solarni paneli postavljeni na krovove Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat)
- Slika 4.16. Dnevna kriva promene snage $P[W]$, monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela pri otvorenim kontaktima temperature za Objekte (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), FN solarni paneli, zajedno sa stiroporom, postavljeni na krovove Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat)
- Slika 4.17. Dnevna kriva promene snage $P[W]$, monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela pri otvorenim kontaktima temperature za Objekte (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), FN solarni paneli postavljeni na fasade Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat)
- Slika 4.18. Dnevna kriva promene snage $P[W]$, monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela pri otvorenim kontaktima temperature za Objekte (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), FN solarni paneli, zajedno sa stiroporom, postavljeni na fasade Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat)
- Slika 4.19. Snimljene P-V karakteristike kadijum telurida (CdTe) u toku godišnjih doba na modelu-prvi Objekat, uz konfiguraciju panela: a) na krovu objekta; b) na krovu objekta zajedno sa stiroporom; 1-leto, 22.06.2018.; 2-proleće, 25.03.2018.; 3-zima, 22.12.2017.; 4-jesen, 22.09.2017.
- Slika 4.20. Snimljene P-V karakteristike kadijum telurida (CdTe) u toku godišnjih doba na modelu-prvi Objekat, uz konfiguraciju panela: a) na fasadama objekta; b) na fasadama objekta zajedno sa stiroporom; 1-leto, 22.06.2018.; 2-proleće, 25.03.2018.; 3-zima, 22.12.2017.; 4-jesen, 22.09.2017.
- Slika 4.21. Snimljene P-V karakteristike bakar indijum diselenida (CIS) u toku godišnjih doba na modelu-prvi Objekat, uz konfiguraciju panela: a) na krovu objekta; b) na krovu objekta zajedno sa stiroporom; 1-leto, 22.06.2018.; 2-proleće, 25.03.2018.; 3-zima, 22.12.2017.; 4-jesen, 22.09.2017.
- Slika 4.22. Snimljene P-V karakteristike bakar indijum diselenida (CIS) u toku godišnjih doba na modelu-prvi Objektu, uz konfiguraciju panela: a) na fasadama objekta; b) na fasadama objekta zajedno sa stiroporom; 1-leto, 22.06.2018.; 2-proleće, 25.03.2018.; 3-zima, 22.12.2017.; 4-jesen, 22.09.2017.

- Slika 5.1. *Određivanje funkcija raspodele probojnog vremena*
- Slika 5.2. *Zakon uvećanja za Weibull-ovu raspodelu predstavljen na papiru verovatnoće (Weibull-ov papir)*

LISTA TABELA

- Tabela 3.1. *Poređenje glavnih karakteristika tri generacije solarnih ćelija*
- Tabela 4.1. *Opšte karakteristike relevantnih nisko-energetskih Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat)*
- Tabela 4.2. *Analiza geoprostornih karakteristika Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat) u odnosu na parametre bioklimatske arhitekture*
- Tabela 4.3. *Maksimalne snage FN monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela u materijalizaciji nisko-energetskih Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), za 2017/18. godinu*
- Tabela 4.4. *Analiza maksimalne snage monokristalnih silicijumskih (sc-Si) solarnih panela u materijalizaciji nisko-energetskih Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), po godišnjim dobima, merenim u toku 2017/18. godine*
- Tabela 4.5. *Analiza maksimalne snage druge generacije FN tehnologije solarnih panela u materijalizaciji modela (prvi Objekat) za 2017/18. godinu*

LISTA DIJAGRAMA

- Dijagram 1.1. *Strukturni dijagram procesa istraživanja*

LISTA SLIKA U PRILOZIMA

- Slika p1.1. *Tipovi uzoraka solarnih ćelija različitih proizvođača:
Tip A - Leybold 37; Tip D – Soltec; Tip E – Siemens; Tip F - Siemens*
- Slika p1.2. *Merna konfiguracija – električna šema*
- Slika p1.3. *Energetska raspodela neutrona iz neutronskeg izvora*
- Slika p2.1. *Zavisnost struje solarne ćelije od vremena (parametar-fluks bele svetlosti); — solarna ćelija tip A; - - - - solarna ćelija tip D;
•••• solarna ćelija tip E; ■■■■ solarna ćelija tip F*
- Slika p2.2. *Zavisnost redne otpornosti solarnih ćelija od vremena (parametar-fluks bele svetlosti); — solarna ćelija tip A; - - - - solarna ćelija tip D; •••• solarna ćelija tip E; ■■■■ solarna ćelija tip F*
- Slika p2.3. *Zavisnost struje solarnih ćelija od vremena uz fluks monohromatske svetlosti SOX lampe kao parametar;
— solarna ćelija tip A; - - - - solarna ćelija tip D;
•••• solarna ćelija tip E; ■■■■ solarna ćelija tip F*

Slika p2.4.	Zavisnosti redne otpornosti solarnih ćelija od vremena uz fluks monohromatske svetlosti SOX lampe kao parametar; —— solarna ćelija tip A; - - - - solarna ćelija tip D; •••• solarna ćelija tip E; ■■■■ solarna ćelija
Slika p2.5.	Zavisnost struje solarne ćelije u realnim uslovima: a) lokacija 1; b) lokacija 2; c) lokacija 3; d) lokacija 4
Slika p2.6.	Zavisnosti redne otpornosti solarnih ćelija od vremena u realnim uslovima: a) lokacija 1; b) lokacija 2; c) lokacija 3; d) lokacija 4
Slika p2.7.	Konstruisanja krive veka trajanja za minimalnu struju u zavisnosti od fluksa bele svetlosti
Slika p2.8.	Krive veka trajanja u zavisnosti od fluksa bele svetlosti: solarna ćelija tip A —; solarna ćelija tip D - - - -; solarna ćelija tip E
Slika p2.9.	Krive veka trajanja u zavisnosti od fluksa monohromatske svetlosti solarne ćelije: solarna ćelija tip A —; solarna ćelija tip D - - - -; solarna ćelija tip E
Slika p2.10.a)	Krive veka trajanja u zavisnosti od fluksa bele svetlosti uz preduslov ozračenja γ zračenjem doze 300 Gy; solarna ćelija tip A —; solarna ćelija tip D - - - -; solarna ćelija tip E
Slika p2.10.b)	Krive veka trajanja u zavisnosti od fluksa bele svetlosti uz preduslov ozračenja γ zračenjem doze 100 Gy; solarna ćelija tip A —; solarna ćelija tip D - - - -; solarna ćelija tip E
Slika p2.10.v)	Krive veka trajanja u zavisnosti od fluksa bele svetlosti uz preduslov ozračenja γ zračenjem doze 500 Gy; solarna ćelija tip A —; solarna ćelija tip D - - - -; solarna ćelija tip E
Slika p2.11.	Krive veka trajanja u zavisnosti od monohromatske svetlosti uz ozračenje n zračenjem doze 10Gy; solarna ćelija tip A —; solarna ćelija tip D - - - -; solarna ćelija tip E
Slika p2.12.	Krive veka trajanja u zavisnosti od lokacije ispitivanja; solarna ćelija tip A —; solarna ćelija tip D - - - -; solarna ćelija tip E (lokacija 1, 2, 3)
Slika p2.13.	Standardno uvećanje u zavisnosti od uvećanja —— fitovana kriva $k = 0,2125$ izrazom (5.17) - - - - - procenjena kriva prema $k = 0,3895$ izrazom (5.17) ••••• dobijene vrednosti standardnog odstupanja eksperimentalno
Slika p2.14.	Minimalna struja u zavisnosti od uvećanja —— fitovana kriva $k = 0,127$ izrazom (5.17) - - - - - procenjena kriva $k = 0,251$ izrazom (5.17) •••••dobijene vrednosti eksperimentom
Slika p3.1.	Prvi Objekat , Opština Rakovica
Slika p3.2.	Drugi Objekat , naselje Krnjača, Opština Palilula
Slika p3.3.	Treći Objekat , naselje Krnjača, Opština Palilula
Slika p3.4.	Četvrti Objekat , Opština Obrenovac
Slika p3.5.	Sastav zidova nisko-energetskih Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat)

LISTA TABELA U PRILOZIMA

Tabela p1t.1.	Oznake tipova uzoraka solarnih ćelija i njihove osnovne karakteristike
---------------	--

<i>Tabela p2t.1.</i>	<i>Efekti starenja solarnih ćelija od vremena uz fluks bele svetlosti</i>
<i>Tabela p2t.2.</i>	<i>Efekti starenja solarnih ćelija od vremena uz fluks monohromatske svetlosti SOX lampe</i>
<i>Tabela p2t.3.</i>	<i>Zavisnost eksponenta veka trajanja za solarnu ćeliju a) tip A; b) tip D; c) tip E uz fluks bele svetlosti</i>
<i>Tabela p2t.4.</i>	<i>Zavisnost eksponenta veka trajanja za solarnu ćeliju a) tip A; b) tip D; c) tip E uz fluks monohromatske svetlosti</i>
<i>Tabela p2t.5.</i>	<i>Zavisnost eksponenta veka trajanja za solarnu ćeliju a) tip A; b) tip D; c) tip E uz dozu gama zračenja</i>
<i>Tabela p2t.6.</i>	<i>Zavisnost eksponenta veka trajanja za solarnu ćeliju a) tip A; b) tip D; c) tip E uz dozu n zračenja</i>
<i>Tabela p2t.7.</i>	<i>Brzina starenja solarnih ćelija po tipu i po poziciji u realnim uslovima preko odgovarajućeg eksponenta veka trajanja</i>

PRILOG 1

EKSPERIMENT

1.a. Uvod

Eksperimentalni deo ovoga rada u osnovi se sastojao od snimanja strujno-naponskih karakteristika uz varijaciju parametara minimalne vrednosti napona i vrste primenjenog elektromagnetnog zračenja. Eksperimenti su vršeni ili pod dobro kontrolisanim laboratorijskim uslovima ili u realnim uslovima primene. Ispitivana su dva veoma važna aspekta za praktičnu primenu fotonaponske konverzije energije:

- 1) starenje fotonaponskog panela u realnim uslovima starenja i u uslovima ubrzanog starenja, i
- 2) primenjivost zakona porasta verovatnoće na konstruktivna rešenja realnih fotonaponskih generatora.

Kao što je rečeno laboratorijska ispitivanja su bila pod dobro kontrolisanim uslovima, dok su tokom ispitivanja u rednim uslovima primene fotonaponskih konvektora energije vršene stalne provere (maksimalno pouzdano) relevantnih parametara za tip izvođenog eksperimenta.

Korišćene su monokristalne i polikristalne solarne ćelije. Njihove strujno-naponske karakteristike snimane su pri beloj svetlosti spektra sličnog spektru sunčeve svetlosti i pri monohromatskoj svetlosti natrijumove SOX lampe pod niskim pritiskom. U cilju ispitivanja efekata starenja pod ubrzanim uslovima korišćeno je gama zračenje C_{60}^{60} i zračenje $\alpha - Be$ neutronske izvoru. Rezultati merenja obrađivani su komercijalnim numeričkim programima i posebnim, u tu svrhu napisanim i podprogramima.

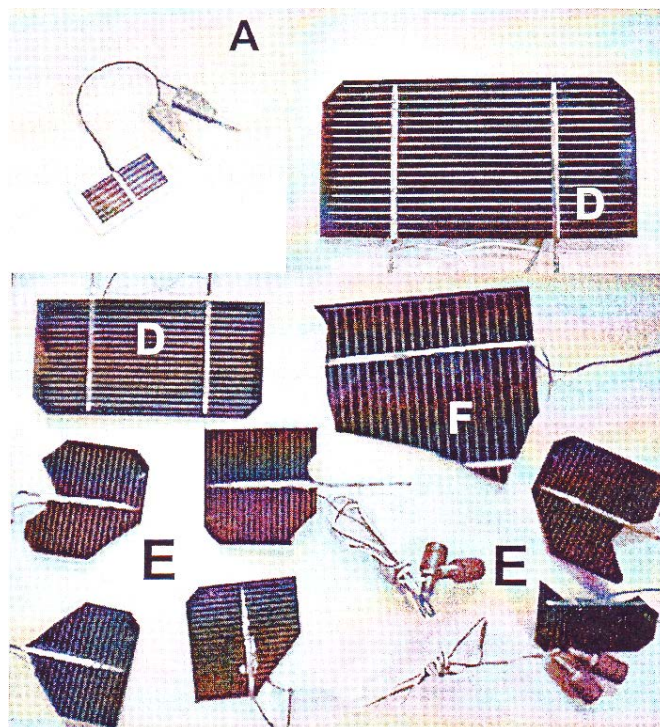
Analiza rezultata merenja data je kroz analizu uticaja sunčeve svetlosti i različitih vrsta radioaktivnih zračenja na osnovne izlazne karakteristike solarnih panela.

1.b. Laboratorijsko merenje strujno-naponskih karakteristika

Strujno-naponska (I-V) karakteristika solarnih panela (ćelija) predstavlja osnovnu i najčešće korišćenu metodu karakterizacije solarnih ćelija. Strujno-naponske karakteristike omogućavaju da se na jednostavan i brz način dođe do velikog broja podataka koji se tiču izlaznih, ali i fundamentalnih parametara solarnih ćelija.

Kao uzorci korišćene su solarne ćelije različitih proizvođača i tipova (slika p1.1) [111]. Oznake tipova uzoraka koji su korišćeni i njihove osnovne karakteristike date su u tabeli p1t.1. Veličine površina solarnih ćelija su varirale kako kod različitih tipova korišćenih

ćelija, tako i u okviru istoga tipa (grupe) uzoraka, tako da su sve vrednosti I-V karakteristika svođene na jediničnu površinu, tj. prikazane su kao površinska gustina struje J_1 [111].

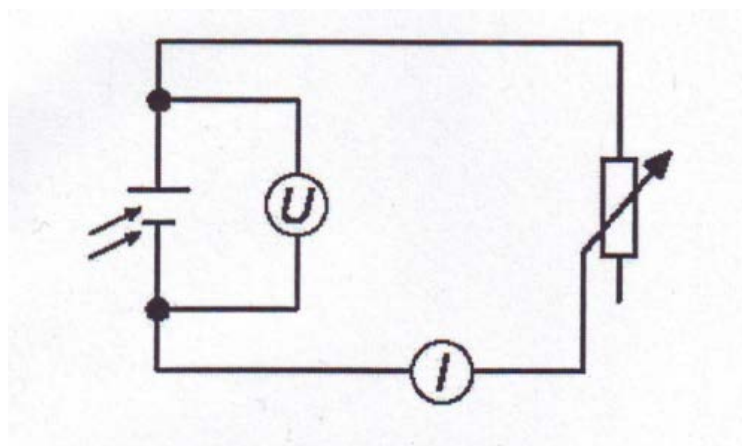


*Slika p1.1. Tipovi uzoraka solarnih ćelija različitih proizvođača:
Tip A - Leybold 37; Tip D – Soltec; Tip E – Siemens; Tip F – Siemens [111]*

Tabela p1t.1. Oznake tipova uzoraka solarnih ćelija i njihove osnovne karakteristike [111]

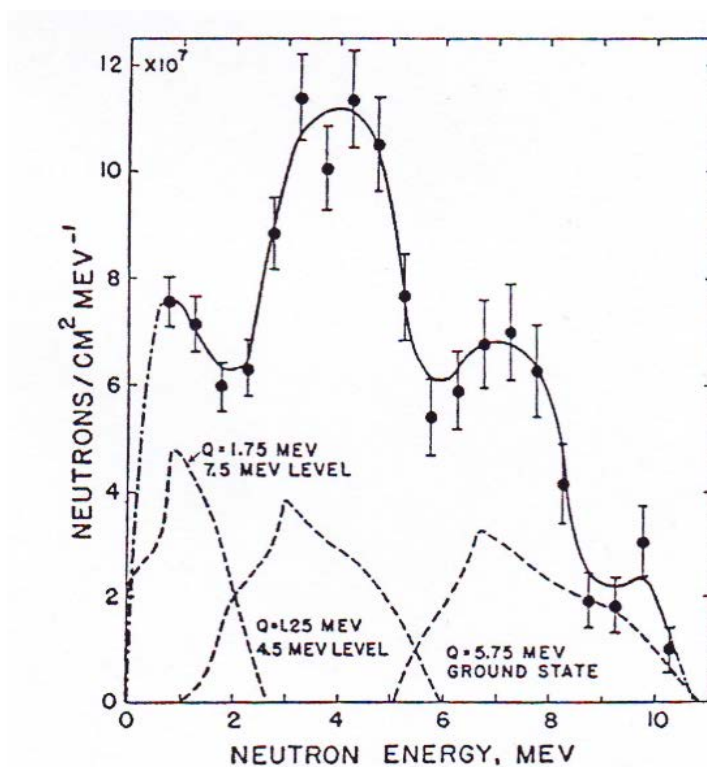
Tip uzorka	Tehnologija	Proizvođač	Enkapsulacija
A	Poli c-Si	Leybold 37	Da
D	Mono c-Si	Soltec	Ne
E	Mono c-Si	Siemens	Ne
F	Poli c-Si	Siemens	Ne

Prilikom merenja strujno-naponskih karakteristika korišćen je standardni postupak, slika p1.2 [112]. Strujne karakteristike snimane su različitim intezitetom bele svetlosti sličnog spektra kao što je spektar sunčane svetlosti. Intezitet primenjivane bele svetlosti variran je od 20 do 400 W/m³. Takođe su snimane i strujno-naponske karakteristike i monokromatskom svetlosti SOX lampe (natrijumova lampa pod niskim pritiskom).



Slika p1.2. Merna konfiguracija – električna šema [112]

Pored toga protokol merenja je predviđao ozračavanje solarnih ćelija gama zračenjem C_{60}^{60} od 0,5 Gy do 4353 KGy aktivnosti izvora 175 Kci (male doze zračenja su obezbeđivane u baždarnici laboratorija za zaštitu od zračenja, a veće doze u Radijacionoj jedinici Instituta za nuklearne nauke Vinča). Za neutronske ozračavanje solarnih ćelija upotrebljavana je tečnost U^{235} -Be izvor. Na slici p1.3. prikazan je energetski spektar neutronskega zračenja [113].



Slika p1.3. Energetska raspodjela neutrona iz neutronskega izvora [113]

Postupak merenja se sastojao od:

- 1) snimanja strujno-naponskih karakteristika izvorom pomenute svetlosti;
- 2) ozračavanja izvora gama zračenja i/ili neutronskega zračenja određene doze;

- 3) ponavljanje snimanja strujno-naponske karakteristike pod istim uslovima (parametrima eksperimenta).

Prilikom ozračavanja solarne ćelije gama i/ili n zračenjem svakim sledećim korakom je povećavana doza, takozvani postupak ubrzanog starenja (apendiks). Istovremeno je na drugom uzorku (solarnoj ćeliji) vršeno kontinualno snimanje volt-sekundne karakteristike pod istom geometrijom i parametrima eksperimenta.

Zaključujemo da su svi ovi eksperimenti vršeni pod dobro kontrolisanim laboratorijskim uslovima. Korišćeni merni instrumenti (voltmetar i ampermetar) bili su baždareni i visokog stepena tačnosti. Nivo osvetljenja regulisan je komercijalnim blendama i kontrolisan pomoću luks metra (i kalibrisane standardne ćelije). Temperatura solarne ćelije je održavana konstantnom 20°C u termalnoj komori (i dodatno kontrolisana termoparom. Kombinovana merna nesigurnost mernog postupka bila je manja od 5%.

1.v. Merenje strujno-naponskih karakteristika u realnim uslovima

Laboratorijska ispitivanja prikazana u prethodnom poglavlju ponovljena su u realnim uslovima grada Beograda. Period ispitivanja solarnih ćelija u realnim uslovima trajao je tačno godinu dana da bi se obuhvatila sva četiri godišnja doba kao i ostale varijacije relevantnih parametara karakterističnih za urbanu sredinu. Korišćene su iste solarne ćelije kao i u laboratorijskim uslovima (tabela p1t.1.). Takođe su korišćeni eksperimentalni postupci sa tom razlikom da je korišćena prirodna sunčeva svetlost i da se na nju nije uticalo blendama. Temperatura takođe nije bila držana konstantnom ali je merena termoparom tokom celoga eksperimenta. Ćelije su čišćene od prašine na svakih šest sati da bi se smanjio uticaj prašine na rezultate. Prilikom postavljanja fotonaponskih ćelija vođeno je računa da se maksimalno zaštite od padavina (snega i kiše). Eksperimentalna oprema je bila postavljena na fasadu stambene kuće na lokaciji 1 u Opštini Rakovica, (Prvi Objekat), na fasadu kuće na lokaciji 2 u naselju Krnjača, Opština Palilula (Drugi Objekat), na fasadu kuće na lokaciji u naselju Krnjača, Opština Palilula (Treći Objekat) i na fasadu kuće na lokaciji 4 na Opštini Obrenovac (Četvrti Objekat).

1.g. Laboratorijsko merenje eksponenta veka trajanja solarnih ćelija

Eksponent veka trajanja solarne ćelije je od odlučujuće važnosti za procenu ekonomičnosti i pouzdanog snabdevanja ovom ustavu generatora. Eksperimentalni deo rada se sastojao od snimanja krive veka trajanja. U tu svrhu je korišćen eksperimentalni sistem prikazan na slici p1.3. Sistem prikazan na slici p1.3 koncipiran je za dugotrajna merenja, upravljanje merenjem i akviziciju podataka. Tokom merenja eksperimentalnim sistemom prikazanim na slici p1.3 vršena su kontinualna merenja napona i struje i osvetljenja. Ukoliko je osvetljaj bio ispod unapred ustanovljene vrednosti postupak merenja je prekidan (stavljen na sleep mode) i uključivan je luksmetrom tek kada je osvetljaj solarne ćelije postajao veći od granične vrednosti. Eksperimentalni sistem je mogao da istovremeno prati kontinualnu struju i napon sa pet solarnih ćelija, tip A tabela p1t.1 sa kojim je isključivo rađeno. U slučaju da je

struja jedne od ispitivačkih ćelija padala ispod, unapred utvrđene vrednosti ona je zamenjivana i na njeno mesto postavljana nova ćelija istih karakteristika (i indentična prethodnoj). Prilikom zamene solarne ćelije vreme rada nove postavljene ćelije je resetovano.

1.d. Određivanje krivih veka trajanja i eksperimenata veka trajanja u realnim uslovima

Eksperimenti određivanja eksponenta veka trajanja bili su dugotrajni eksperimenti, trajanja godinu dana bez prekida. Vršeni su na, skoro, indentičan način pod dobro kontrolisanim laboratorijski uslovima i u realnim uslovima, tj. pričvršćeni za fasade Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat, kao što je opisano). Postupak čišćenja solarnih ćelija je bio indentičan kao i u slučaju snimanja strujno-naponskih karakteristika, sa tim što je, kao i u slučaju snimanja strujno-naponskih karakteristika ostavljan i jedan indentičan sistem, na kome tokom celog ciklusa merenja (godinu dana) nije vršeno čišćenje površine solarnih ćelija. I tokom laboratorijskih ispitivanja i ispitivanja u realnim uslovima vršen je postupak ubrzanog starenja ispitnih solarnih čestica primenom jonizujućeg zračenja.

1.đ. Provera važenja zakona uvećanja za solarne ćelije u laboratorijskim uslovima

Provera zakona porasta verovatnoće vršena je samo za komercijalne fotonaponske panele pod laboratorijskim uslovima. Provera je vršena tako što je izvor bele svetlosti podešen tako, pomoću blende, da je struja fotonaponskog panela bila za 5% veća od minimalne struje. Mereno je je vreme dok struja ne padne ispod minimalne vrednosti. Ova merenja su ponovljena pedeset puta. Nakon toga su ista merenja ponovljena sa dva, četiri, deset i dvadeset paralelno vezanih panela pri čemu je merena struja ukupna vrednost struje iz paralelne veze n panela i poređena sa n -tostrukom vrednosti minimalne struje pojedinačnog panela. Kao slučajna promenljiva ovih merenja uzimano je vreme hoda a n -tostruka vrednost minimalne struje pojedinačnih panela postala je veća od izmerene struje paralelne veze n panela.

1.e. Obrada rezultata merenja

Zbog dugotrajnosti merenja i izloženosti uzoraka merenja uticajima koji nisu bili, uvek, kontrolabilni i uključivi u protokol merenja posebnu pažnju eksperimentalnog postupka bilo je nužno posvetiti stohastičkim pojavama (prekomerne nesigurnosti tip A) i prividno determinističkim pojavama (prekomerne nesigurnosti tip B). Postupak provere reproduktivnosti rezultata sa proverom stabilnosti karakteristika eksperimentalne postavke vršena je jednom nedeljno, pri čemu nije prekidano postupak merenja već je samo proveravano eksperimentalno postrojenje zamenjivano rezervnim (novim ili remontovanim postrojenjem).

Iz tog razloga, tj. zbog dugotrajnosti merenja i ireverzibilnim efektima merenja na uzorke (solarne ćelije) posebna pažnja je posvećivana indentičnosti ispitivanih ćelija. Za ispitivanje uzoraka tip A bilo je nabavljeno 2.000 uzoraka (sa garancijom proizvođača o njihovoj indentičnosti), dok je za ostale uzorke nabavljano po 1.000 uzoraka sa istom garancijom proizvođača. Pošto, za ovu vrstu merenja garancija proizvođača nije bila dovoljna, svaka grupa uzoraka je testirana na pripadnost jedinstvenom statističkom uzorku slučajnih promenljivih-napon fotoćelije bez opterećenja i struja fotoćelije sa profesionalnim mernim šantom $0,2\ \Omega$. Testiranje je vršeno U-testom tako što su dobijeni rezultati na 2.000 odnosno 1.000 uzoraka deljeni na hronološke grupe od po 100 slučajnih promenljivih i testirani U-testom 5% statističke sigurnosti na pripadnost jedinstvenom statističkom uzorku. Pre testiranja U-testom statistički uzorci su bili očišćeni od sumljivih rezultata merenja modifikovanim Šoveneovim kriterijumom.

Prečišćeni i provereni statistički uzorci slučajnih promenljivih napon fotoćelije bez opterećenja i struja fotoćelije sa profesionalnim šantom testirane su na pripadnost Normalnoj, Dvostrukoeksponencijalnoj i troparametarskoj Weibull-ovoj raspodeli. Ispitivanje pripadnosti slučajnih promenljivih teoretskim statističkim raspodelama vršeno je grafičkom, momentnom i metodom maksimalne verodostojnosti. Na osnovu dobijenih rezultata bilo je moguće crtati strujno-naponske krive i krive veka trajanja u zavisnosti od parametara eksperimenta.

PRILOG 2

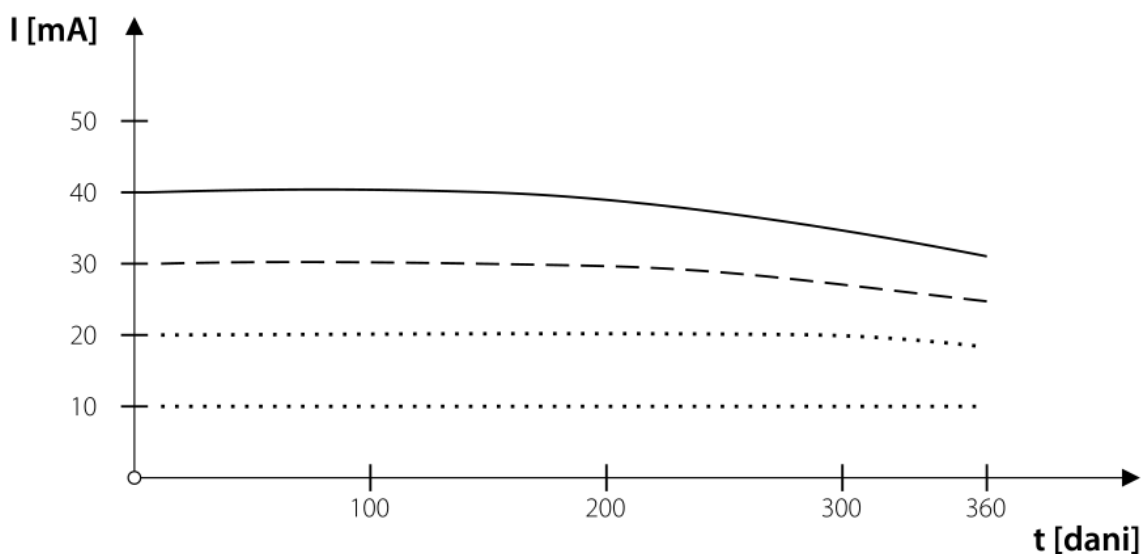
REZULTATI I DISKUSIJA

2.a. Uvod

Statistički uzorci ispitivanih slučajno promenljivih veličina provereni i pročišćeni od slučajnih, ne stohističkih, fluktuacija bili su osnov za prikaz dobijenih rezultata. Rezultati i odgovarajuća diskusija su prikazani u istom hronološkom redu u kome su opisani i eksperimentalni postupci. To, nipošto, ne znači da su rezultati dobijeni takvim, hronološkim, redom. Naime zbog obimnosti eksperimenti su izvođeni paralelno u vremenu (često i više eksperimenata na različitim lokacijama istovremeno). Ovakav prikaz rezultata je bio nužan iz razloga jasnosti i uporedivosti koji bi se, u drugom slučaju, zbog dugotrajnosti eksperimentalnog postupka.

2.b. Strujno-naponske karakteristike solarnih ćelija ispitane pod laboratorijskim uslovima

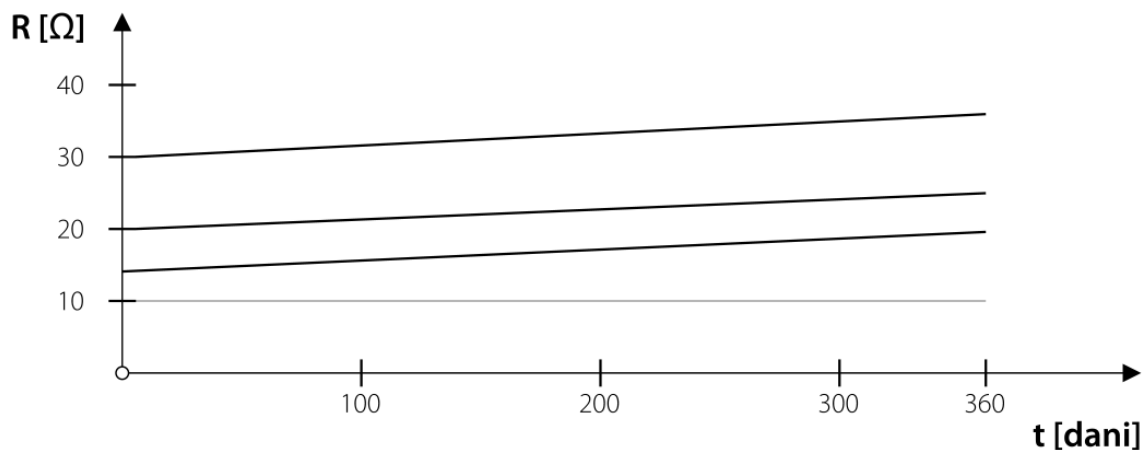
Na slici p2.1 su prikazana zavisnost struje solarne ćelije tipa A, D, E, F, od vremena za koju je izvršeno prilagođavanje po snazi dobijene struje uz fluks bele svetlosti kao parametar.



Slika p2.1. Zavisnost struje solarne ćelije od vremena (parametar-fluks bele svetlosti);

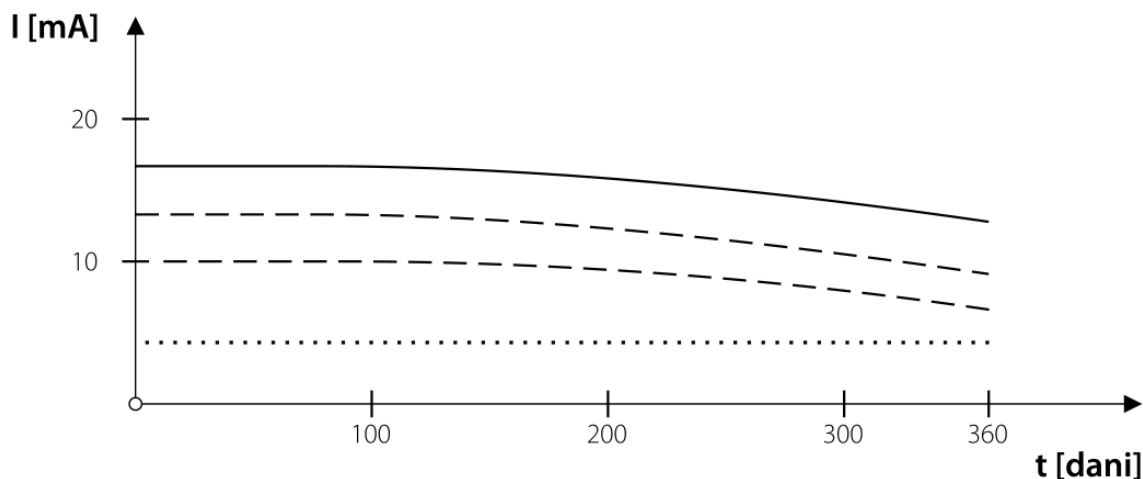
— solarna ćelija tip A; - - - - solarna ćelija tip D;
•••• solarna ćelija tip E; - • - • solarna ćelija tip F

Na slici p2.2 su prikazane zavisnost redne otpornosti solarnih ćelija tipa A, D, E, F od vremena uz fluks bele svetlosti kao parametar.



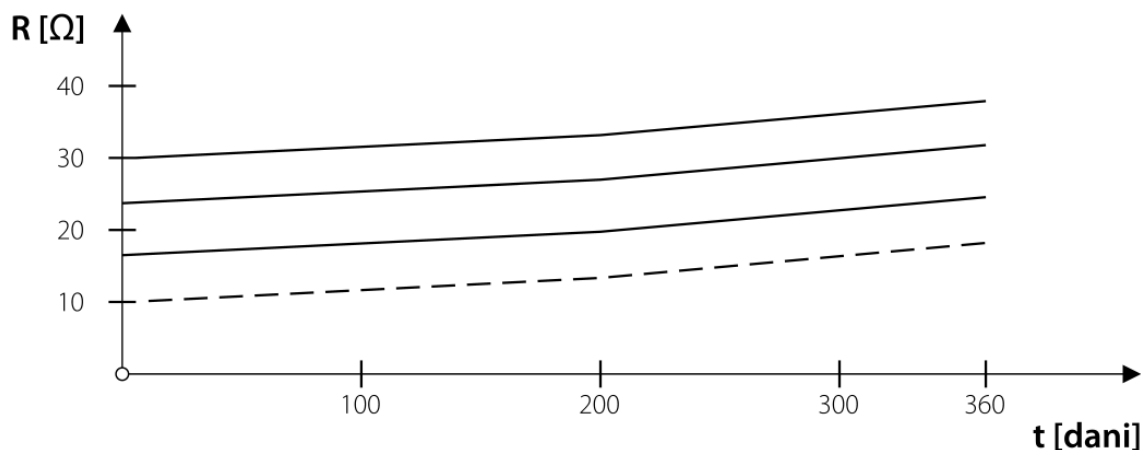
Slika p2.2. Zavisnost redne otpornosti solarnih ćelija od vremena (parametar-fluks bele svetlosti);
 — solarna ćelija tip A; - - - - solarna ćelija tip D;
 •••• solarna ćelija tip E; ■■■■ solarna ćelija tip F

Na slici p2.3 prikazana su zavisnost struje solarnih ćelija tipa A, D, E, F za koju je izvršeno prilagođavanje po snazi od vremena uz fluks monohromatske svetlosti SOX lampe kao parametar.



Slika p2.3. Zavisnost struje solarnih ćelija od vremena uz fluks monohromatske svetlosti SOX lampe kao parametar; — solarna ćelija tip A; - - - - solarna ćelija tip D;
 •••• solarna ćelija tip E; ■■■■ solarna ćelija tip F

Na slici p2.4 su prikazane zavisnosti redne otpornosti solarnih ćelija tipa A, D, E, F od vremena uz fluks monohromatske svetlosti SOX lampe kao parametar.



Slika p2.4. Zavisnosti redne otpornosti solarnih ćelija od vremena uz fluks monohromatske svetlosti SOX lampe kao parametar; — solarna ćelija tip A; - - - - solarna ćelija tip D; •••• solarna ćelija tip E; ■■■■ solarna ćelija tip F

Na osnovu rezultata prikazanih na slikama p2.1, p2.2, p2.3, p2.4 se vidi da postoji znatan efekat starenja koji je izraženiji u slučaju bele nego u slučaju monohromatske svetlosti. Promene izazvane starenjem u laboratorijskim uslovima na godišnjem nivou se manifestuju opadanjem struje solarne ćelije i porastom njene unutrašnje otpornosti. Ovaj efekat se nije znatno menjao korekcijom prilagodne otpornosti na nedeljnom nivou tokom merenja. Uočeni efekat se može objasniti promenama na strukturnom nivou solarnih ćelija pri kojima pojedinačne monokristalne zone gube svoje poluprovodne karakteristike usled čega dolazi do manjeg broja prelaza iz valentne u provodnu zonu. Ove promene su, skoro 100% ireverzibilne.

2.b.1. Analiza efekta starenja solarnih ćelija tipa: A, D, E, F, od vremena, opadanjem struje i porastom unutrašnje otpornosti uz parametre: fluks bele svetlosti i monohromatske svetlosti SOX lampe, pod laboratorijskim uslovima

Dobijeni rezultati efekta starenja solarnih ćelija od vremena (prethodno Potpoglavlje 2.b.), izazvani parametrima fluks bele svetlosti i fluks monohromatske svetlosti SOX lampe, analizirani su u tabeli p2t.1 i u tabeli p2t.2.

Tabela p2t.1. Efekti starenja solarnih ćelija od vremena uz fluks bele svetlosti

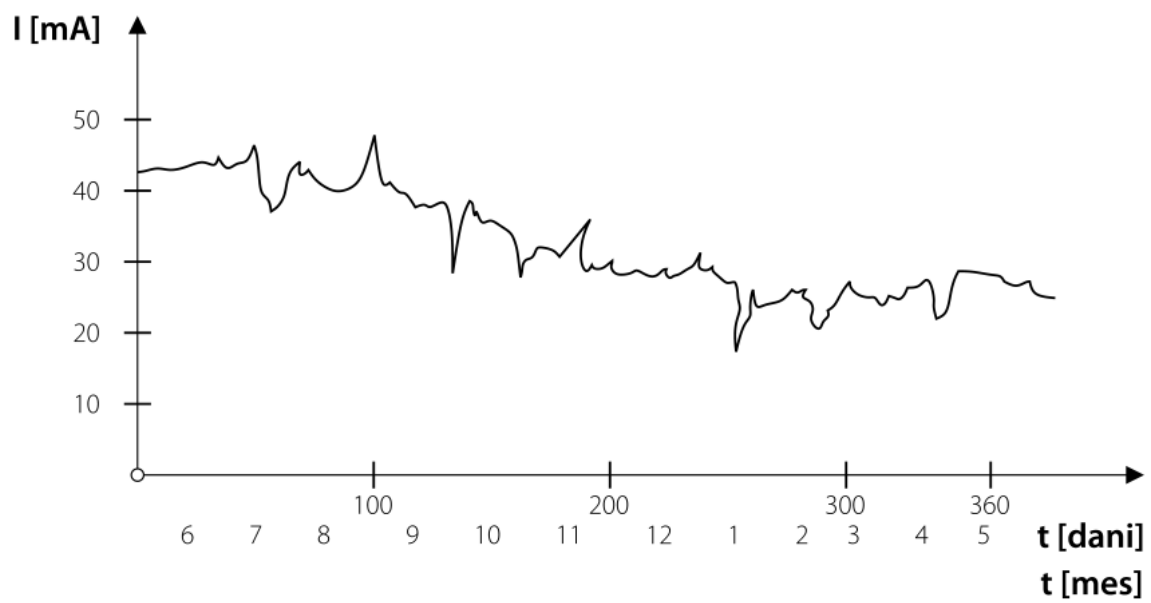
	Efekti starenja solarnih ćelija od vremena uz fluks bele svetlosti			
	zavisnost struje I [A] od vremena [t] uz fluks bele svetlosti		zavisnost redne otpornosti R [Ω] od vremena [t] uz fluks bele svetlosti	
tipovi solarnih ćelija	početna vrednost struje I [A]	krajnja vrednost struje I [A]	početna vrednost redne otpornosti R [Ω]	krajnja vrednost redne otpornosti R [Ω]
tip A	40	36	30	34
tip D	30	28	20	25
tip E	20	18	12	17
tip F	10	10	10	10

Tabela p2t.2. Efekti starenja solarnih ćelija od vremena uz fluks monohromatske svetlosti SOX lampe

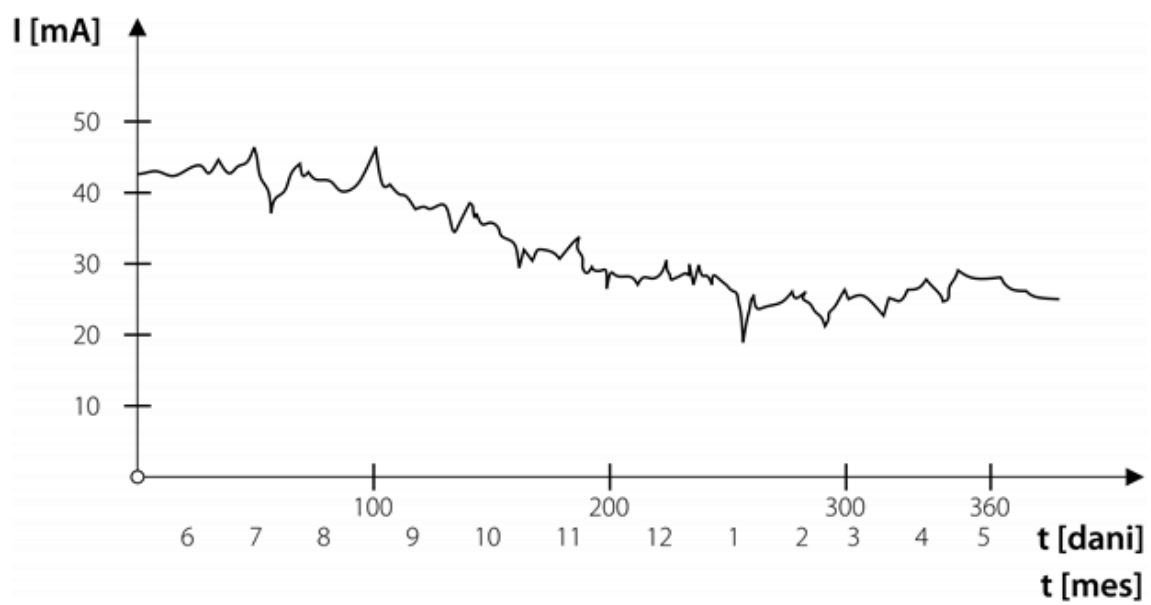
	Efekti starenja solarnih ćelija od vremena uz fluks monohromatske svetlosti SOX lampe			
	zavisnost struje I [A] od vremena [t] uz fluks monohromatske svetlosti SOX lampe		zavisnost redne otpornosti R [Ω] od vremena [t] uz fluks monohromatske svetlosti SOX lampe	
tipovi solarnih ćelija	početna vrednost struje I [A]	krajnja vrednost struje I [A]	početna vrednost redne otpornosti R [Ω]	krajnja vrednost redne otpornosti R [Ω]
tip A	16	14	30	35
tip D	13	10	23	28
tip E	10	6	18	21
tip F	4	4	10	16

2.v. Strujno-naponske karakteristike solarne ćelije pod realnim uslovima

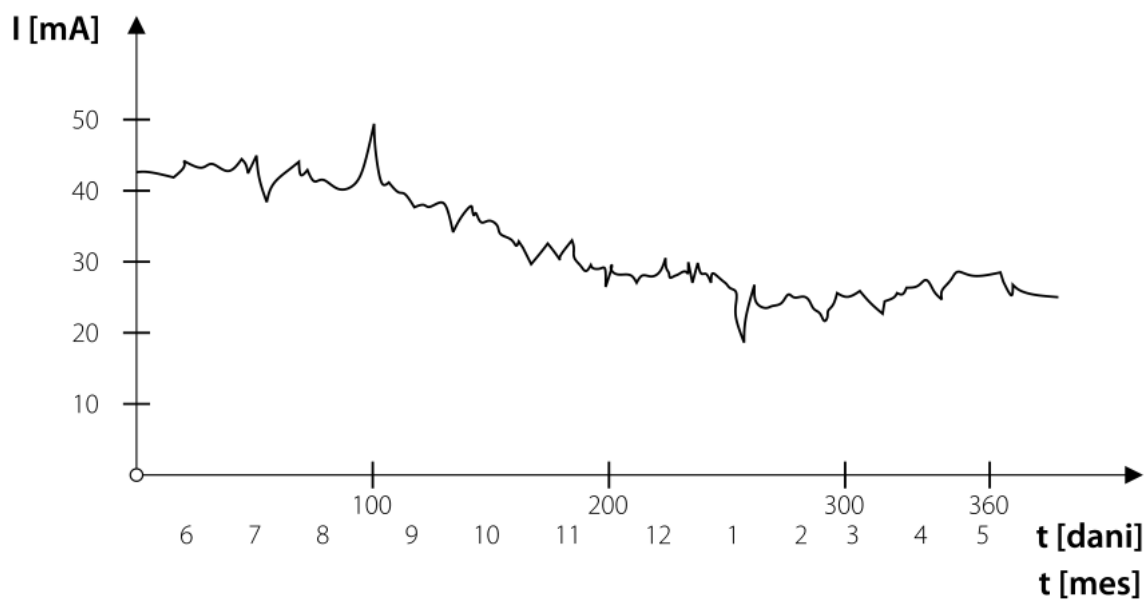
Na slici p2.5 prikazana je zavisnost struje solarne ćelije za koji je izvršeno prilagođavanje po snazi od vremena u realnim (prinudnim) uslovima na četiri definisane lokacije u Beogradu.



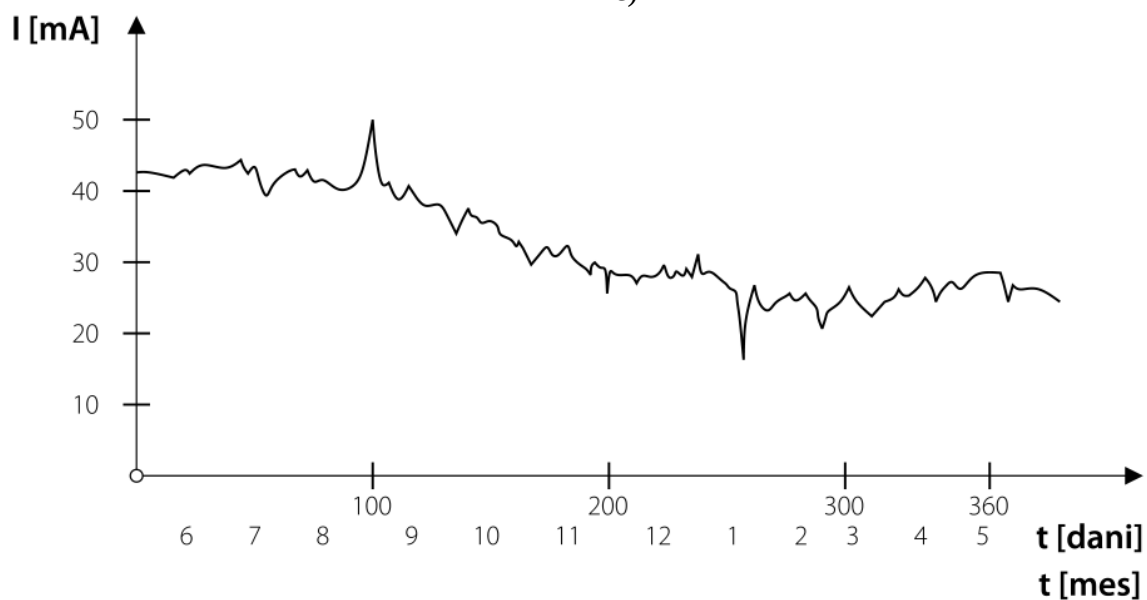
a)



b)



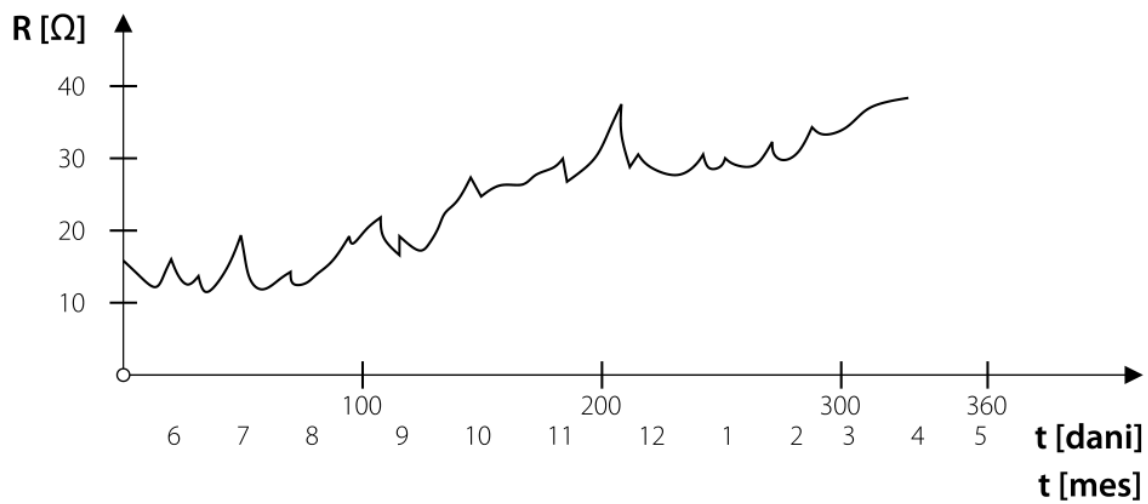
c)



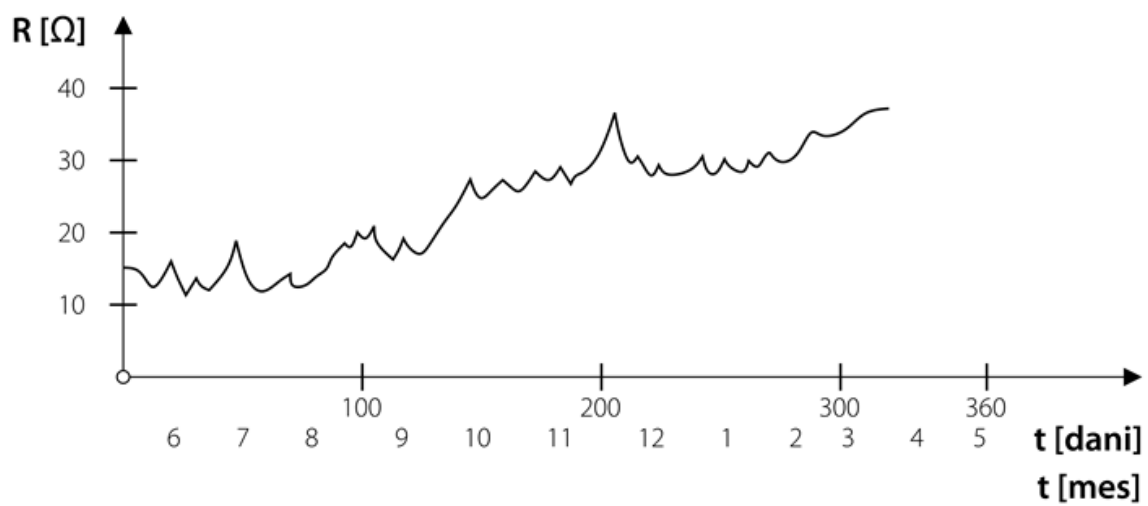
d)

Slika p2.5. Zavisnost struje solarne ćelije u realnim uslovima:
a) prva lokacija; b) druga lokacija; c) treća lokacija; d) četvrta lokacija

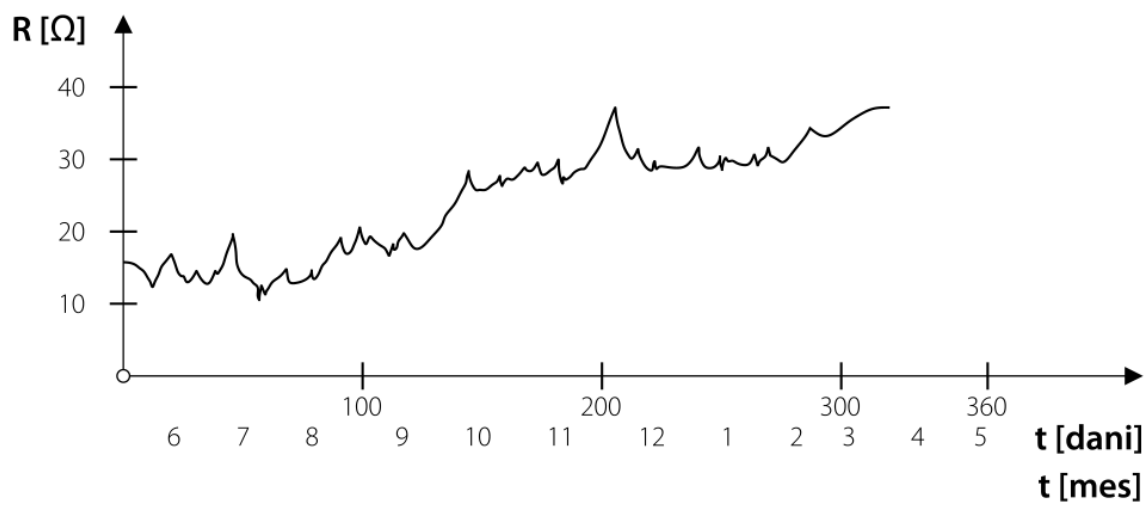
Na slici p2.6 su prikazane zavisnosti redne otpornosti solarnih ćelija od vremena u realnim uslovima na četiri lokacije u Beogradu.



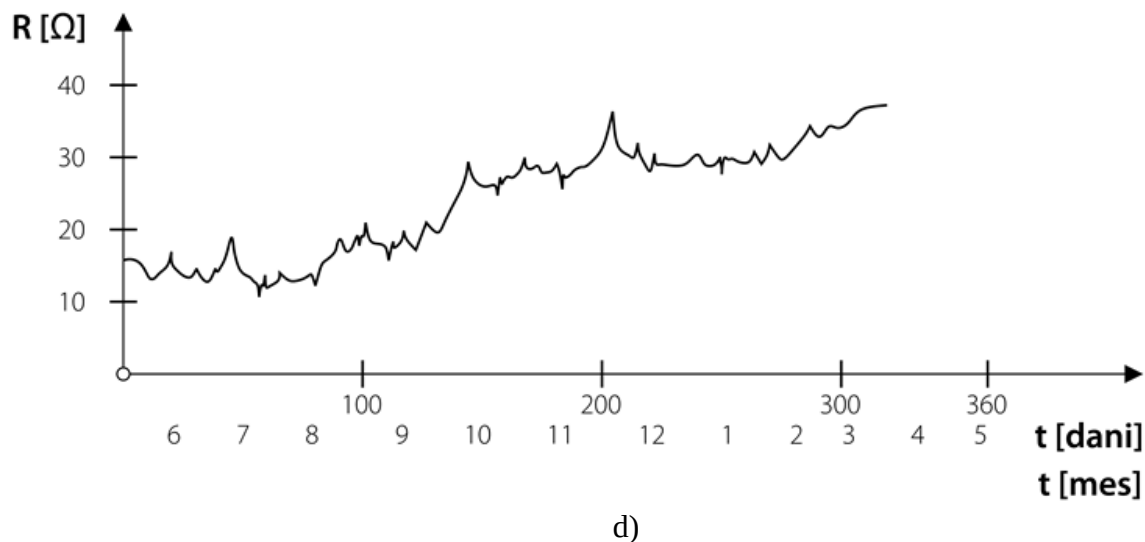
a)



b)



c)

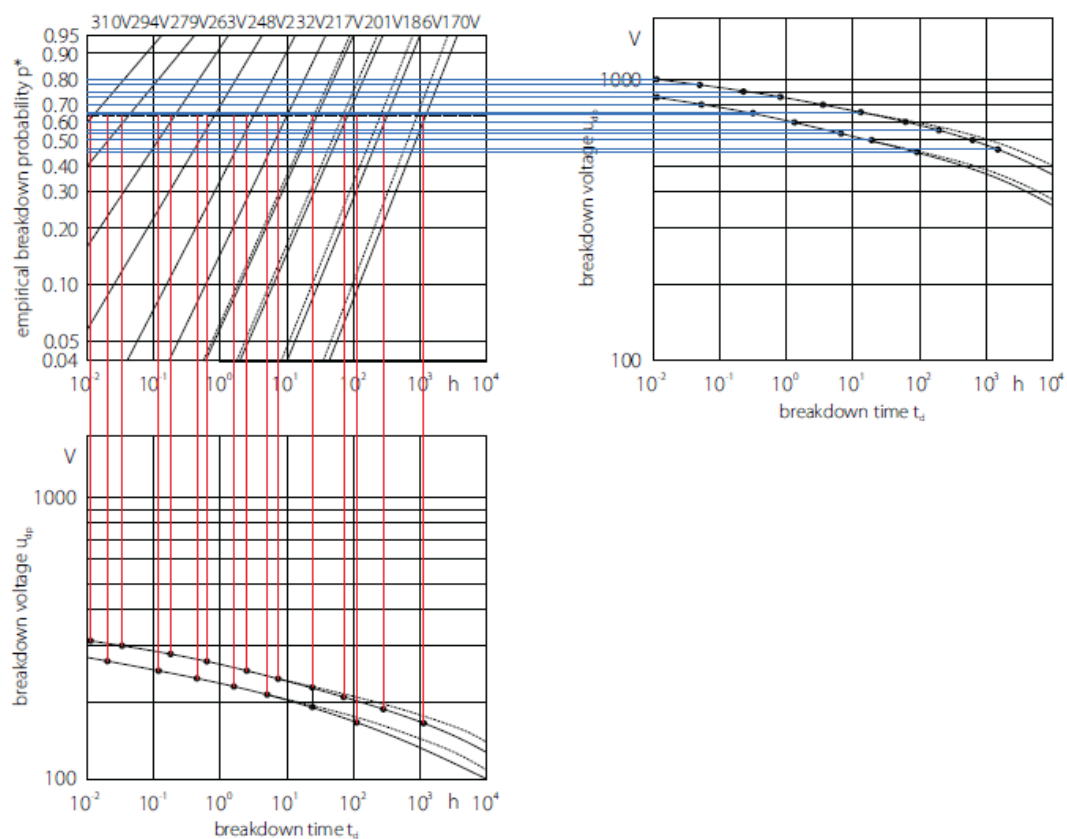


Slika p2.6. Zavisnosti redne otpornosti solarnih ćelija od vremena u realnim uslovima:
a) prva lokacija; b) druga lokacija; c) treća lokacija; d) četvrta lokacija

Na osnovu krivih prikazanih na slikama p2.5 i p2.6 se vidi da se struja solarnih ćelija, u realnim uslovima, ponaša u skladu sa sezonskim i meteorološkim uslovima (merena snaga solarnih panela u Poglavlju 4.). Pri tome se takođe vidi da tokom jedne godine korišćenja dolazi do malih ireverzibilnih promena koje su dovoljne da, integralnim efektom na duži vremenski period, rezultuju neekonomičnošću primene tih solarnih ćelija.

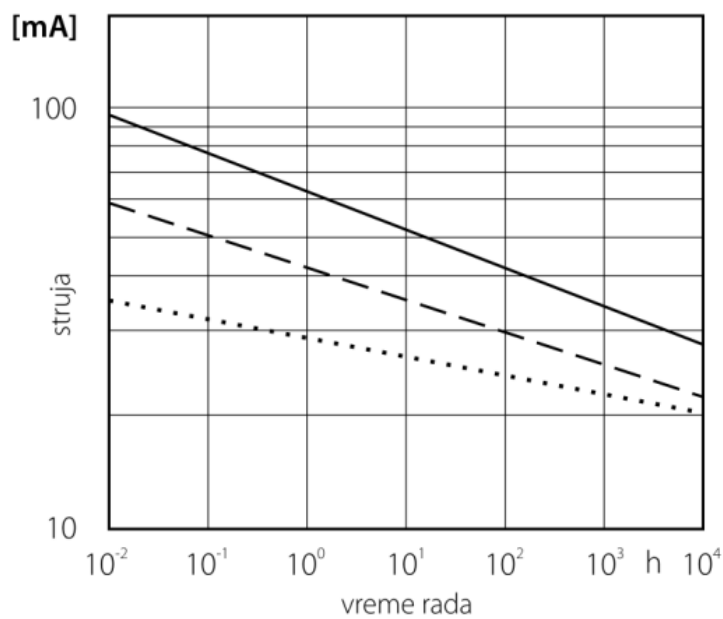
2.g. Određivanje krivih veka trajanja i ekponenta veka trajanja solarnih ćelija u laboratorijskim uslovima

Na slici p2.7 je prikazan primer konstruisanja krive veka trajanja za minimalnu struju u zavisnosti od fluksa bele svetlosti.



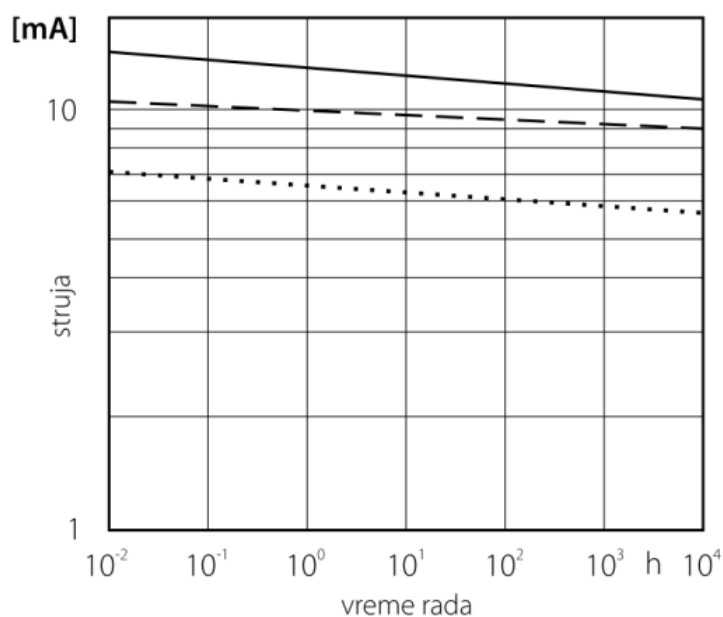
Slika p2.7. Konstruisanja krive veka trajanja za minimalnu struju u zavisnosti od fluksa bele svetlosti [132]

Na slici p2.8 su prikazane krive veka trajanja solarnih ćelija u zavisnosti od fluksa bele svetlosti.



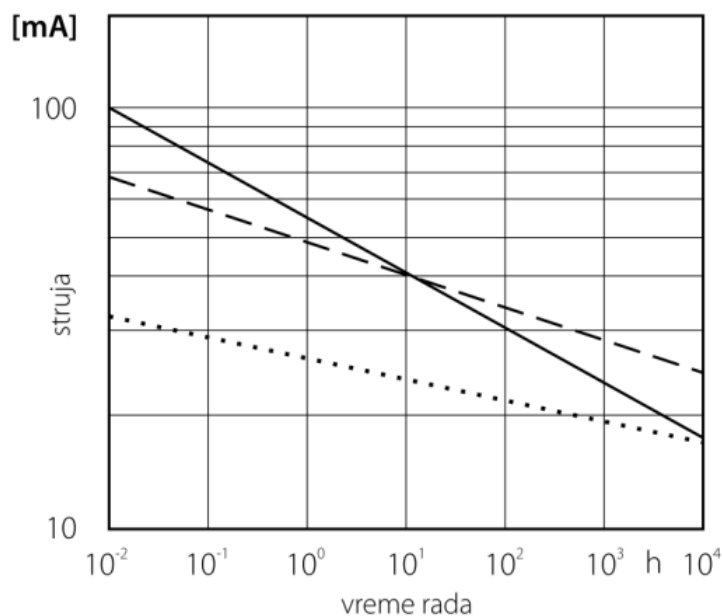
Slika p2.8. Krive veka trajanja u zavisnosti od fluksa bele svetlosti: solarna ćelija tip A —; solarna ćelija tip D - - -; solarna ćelija tip E

Na slici p2.9 su prikazane krive veka trajanja ispitivanih solarnih ćelija u zavisnosti od fluksa monohromatske svetlosti (SOX lamp).

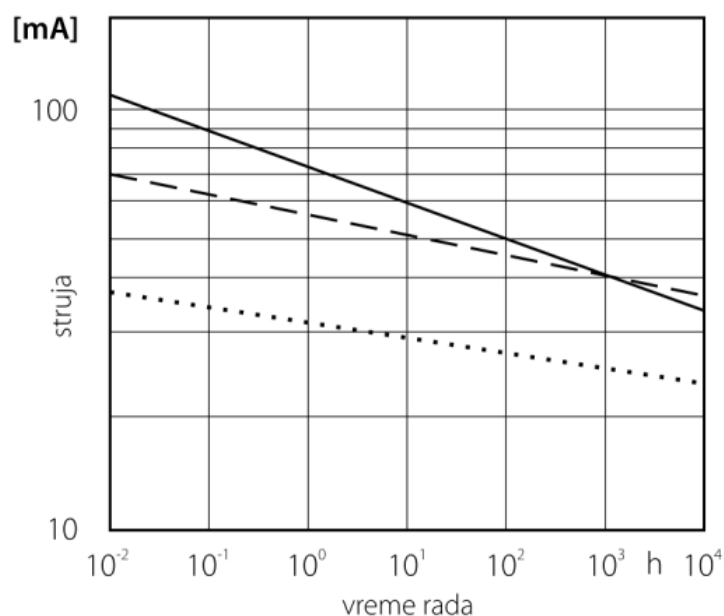


Slika p2.9. Krive veka trajanja u zavisnosti od fluksa monohromatske svetlosti solarne ćelije: solarne ćelija tip A —; solarne ćelija tip D - - -; solarne ćelija tip E

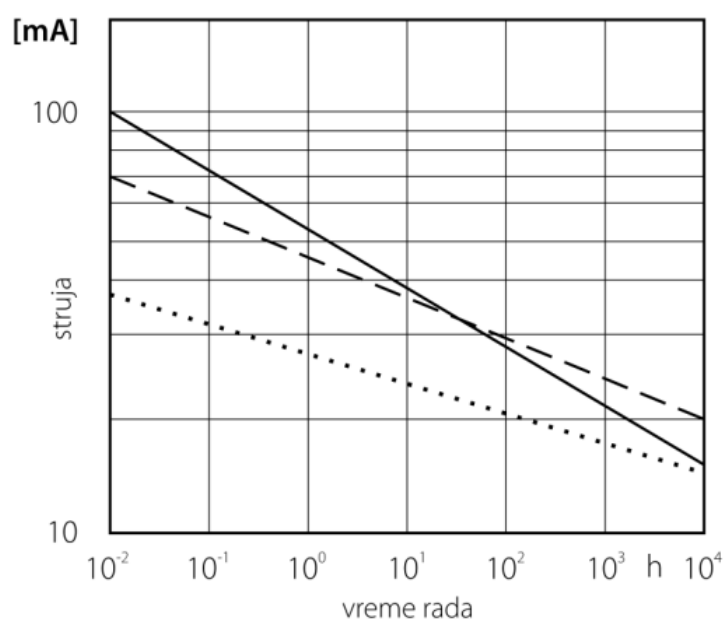
Na slici p2.10 su prikazane krive veka trajanja ispitivanih solarnih ćelija koje u zavisnosti od fluksa bele svetlosti uz prethodno primenjenu dozu γ zračenja kao parametra.



Slika p2.10.a) Krive veka trajanja u zavisnosti od fluksa bele svetlosti uz preduslov ozračenja γ zračenjem doze 300 Gy; solarne ćelija tip A —; solarne ćelija tip D - - -; solarne ćelija tip E

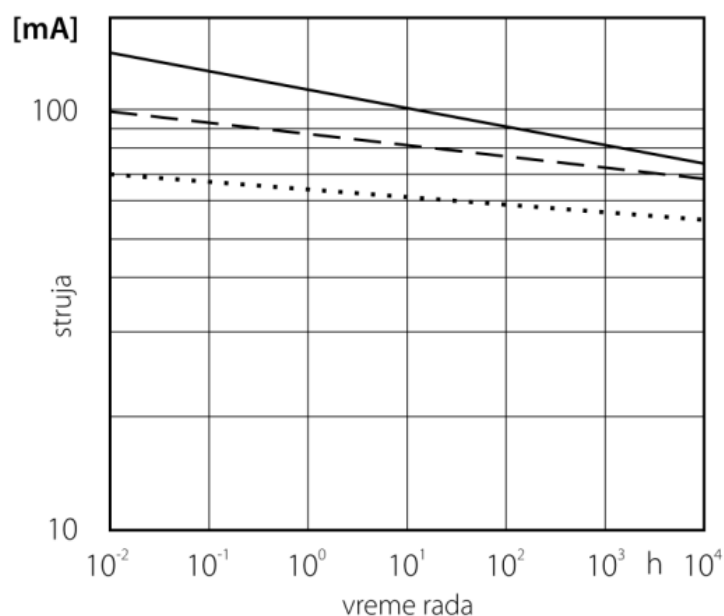


Slika p2.10.b.) Krive veka trajanja u zavisnosti od fluksa bele svetlosti uz preduslov ozračenja γ zračenjem doze 100 Gy; solarna ćelija tip A —; solarna ćelija tip D - - -; solarna ćelija tip E



Slika p2.10.v) Krive veka trajanja u zavisnosti od fluksa bele svetlosti uz preduslov ozračenja γ zračenjem doze 500 Gy; solarna ćelija tip A —; solarna ćelija tip D - - -; solarna ćelija tip E

Na slici p2.11 su prikazane krive veka trajanja ispitivanih solarnih ćelija u zavisnosti od fluksa monohromatske svetlosti uz primenjenu dozu n zračenja kao parametra.



Slika p2t.11. Krive veka trajanja u zavisnosti od monohromatske svetlosti uz ozračenje n zračenjem doze 10Gy;
solarna ćelija tip A —; solarna ćelija tip D - - - -;
solarna ćelija tip E

U tabeli p2t.3 su date vrednosti esponenta veka trajanja određenog primenom izraza (5.7) za solarne ćelije uz fluks bele svetlosti parametra.

Tabela p2t.3. Zavisnost eksponenta veka trajanja za solarnu ćeliju a) tip A; b) tip D;
c) tip E uz fluks bele svetlosti

fluks bele svetlosti [W/m ²]					
eksponent veka trajanja	16	32	58	97	110
a)	12,8	11,4	11	10,2	9,8

fluks bele svetlosti [W/m ²]					
eksponent veka trajanja	16	32	58	97	110
b)	13,5	13,1	12,8	12,5	12

fluks bele svetlosti [W/m ²]					
eksponent veka trajanja	16	32	58	97	110
c)	17,7	14,5	14,1	14	14

U tabeli p2t.4 su date vrednosti eksponenta veka trajanja određenog primenom izraza (5.7) za solarne ćelije uz fluks monohromatske svetlosti kao parametar.

Tabela p2t.4. Zavisnost eksponenta veka trajanja za solarnu ćeliju a) tip A; b) tip D; c) tip E uz fluks monohromatske svetlosti

fluks monohromatske svetlosti [W/m ²]					
eksponent veka trajanja	3,2	5,12	7,25	8,54	9,51
12,8	11,4	11	10,2	9,8	a)

fluks monohromatske svetlosti [W/m ²]					
eksponent veka trajanja	3,2	5,12	7,25	8,54	9,51
17,2	17	16,9	16,3	16	b)

fluks monohromatske svetlosti [W/m ²]					
eksponent veka trajanja	3,2	5,12	7,25	8,54	9,51
18,2	18	17,8	17,5	17,2	c)

U tabeli p2t.5 su date vrednosti eksponenta veka trajanja određenog primenom izraza (5.7) za solarne ćelije uz dozu γ zračenja kao parametar.

Tabela p2t.5. Zavisnost eksponenta veka trajanja za solarnu ćeliju a) tip A; b) tip D; c) tip E uz dozu gama zračenja

doza gama zračenja Gy					
eksponent veka trajanja	50	100	200	250	300
12,2	10,9	10	9,5	9	a)

doza gama zračenja Gy					
eksponent veka trajanja	50	100	200	250	300
12,9	12,5	11,8	11	10,7	b)

doza gama zračenja Gy					
eksponent veka trajanja	50	100	200	250	300
14	13,7	13,2	13,1	12,8	c)

U tabeli p2t.6 su date vrednosti eksponenta veka trajanja određenog primenom izraza (5.7) za solarne ćelije uz dozu n zračenja kao parametar.

Tabela p2t.6. Zavisnost eksponenta veka trajanja za solarnu ćeliju a) tip A; b) tip D; c) tip E uz dozu n zračenja

doza n zračenja Gy					
eksponent veka trajanja	5	10	20	25	30
a)	11,8	11	10,5	9,8	9,2

doza n zračenja Gy					
eksponent veka trajanja	5	10	20	25	30
b)	12	11,9	11,1	10,2	9,8

doza n zračenja Gy					
eksponent veka trajanja	5	10	20	25	30
c)	13,6	12,	12	11,6	10,8

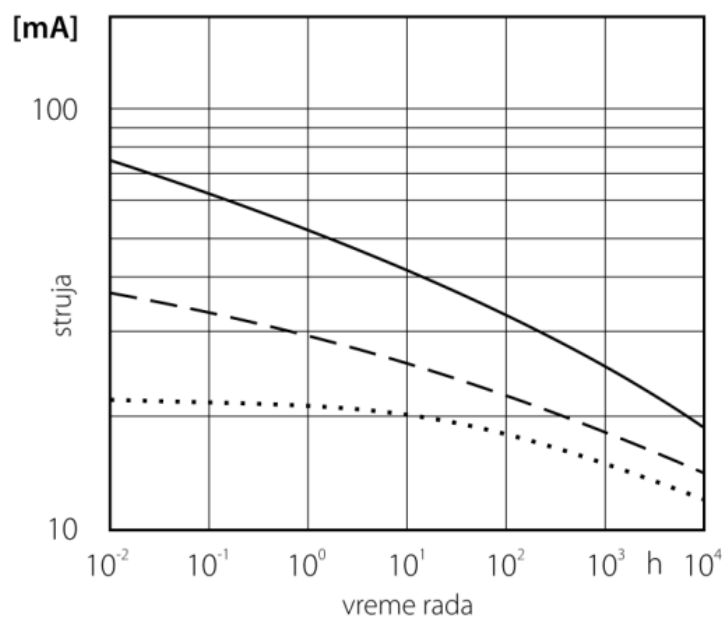
Na osnovu rezultata prikazanih na slikama p2.7, p2.8, p2.9, p2.10 i p2.11 i u tabelama p2t.3, p2t.4, p2t.5, i p2t.6 se vidi da solarne ćelije u laboratorijskim uslovima stare jednim jedinstvenim mehanizmom. Takođe se vidi da brzina starenja ispitivanih ćelija nije ista za sve ispitivane ćelije. Pored toga je uočljivo da solarne ćelije izložene fluksu bele svetlosti brže stare od istih tipova solarnih ćelija izloženih monohromatskoj svetlosti. Što se tiče efekta dejstva γ i n zračenja može se videti da obe vrste zračenja dovode do ubrzanja procesa starenja (pri čemu dejstvo n zračenja dovodi do većeg ubrzanja procesa starenja, pri čemu treba imati u vidu da n -zračenje nije čisto već da ima i jednu γ komponentu).

Takvi rezultati se mogu objasniti efektom interakcije elektromagnetnog zračenja sa kristalnom rešetkom (fonon–foton interakcija). Navodno tu treba razlikovati efekte nejonizujućeg zračenja. Naime, svaki oblik elektromagnetnog zračenja ima i jednu destruktivnu komponentu prilikom interakcije sa kristalnom rešetkom. Takve komponente interakcije mogu biti rezonantnog ili neelastičnog tipa. U tom smislu blaga destrukcija kristalne strukture pod dejstvom nejonizujućeg zračenja je izraženija u slučaju bele svetlosti nego u slučaju monohromatske svetlosti pošto u spektru bele svetlosti ima znatno više harmonika pa samim tim, i verovatnoća destruktivne interakcije (koja je kumulativnog tipa) je veća nego u slučaju monohromatske svetlosti koja ima samo jedan harmon (frekvenciju). U

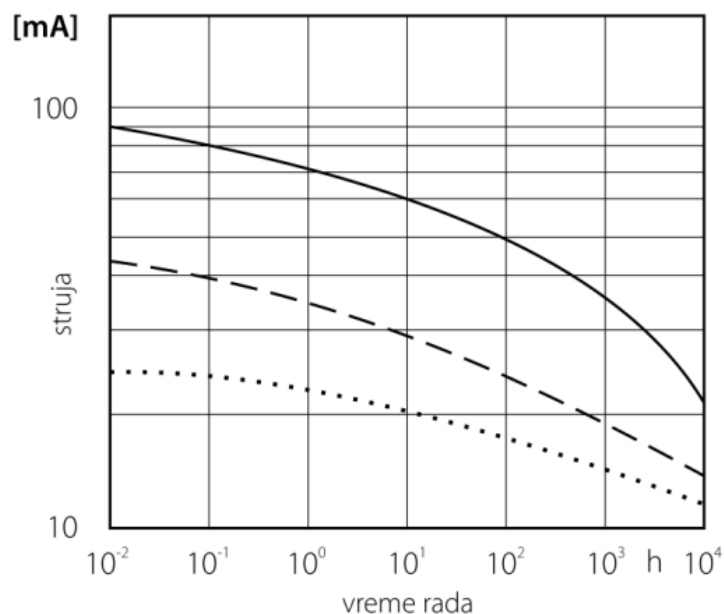
slučaju jonizujućeg zračenja destruktivne interakcije sa kristalnom rešetkom su intenzivnije pošto nisu kumulativnog tipa, tj. pošto svaki kvant γ zračenja ima veću energiju od energije veze elektrona u strukturi, odnosno svaki neutron može mehaničkim sudarom da je jonizuje (a i sekundarnim efektima u sledećem stepenu). Procesi destrukcije su izraženiji u slučaju neutronske zračenja koje ima izraženu komponentu γ zračenja pošto ono nosi veću energiju i pored jonizacije može da proizvede efekte direktne interakcije sa jezgrom, odnosno nukleonima u njemu. Nakon primanja doze ovakvog jonizujućeg zračenja kristalna struktura solarnih ćelija biva dovoljno oštećena da postaje osetljivija i na efekte interakcije sa nejonizujućim zračenjem što rezultira ubrzavanjem starenja.

2.d. Određivanje krivih veka trajanja i eksponenta veka trajanja solarnih ćelija u laboratorijskim uslovima

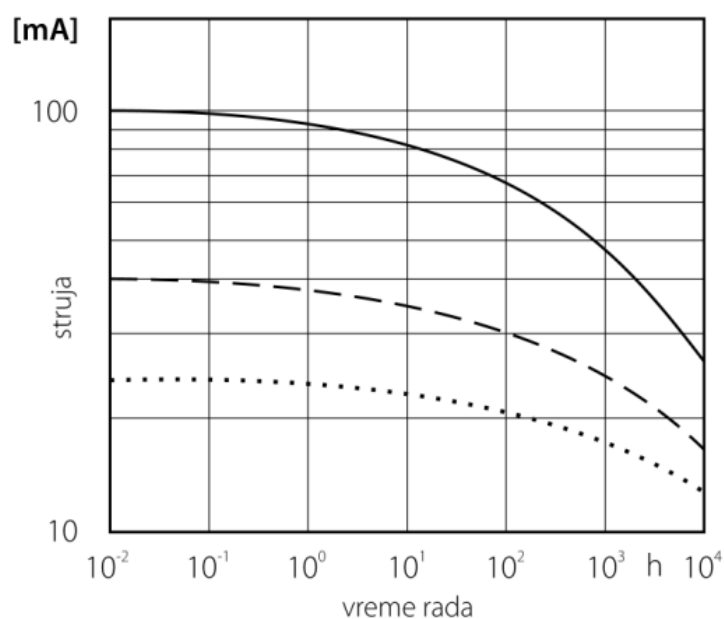
Na slici p2.12 prikazane su krive veka trajanja solarnih ćelija dobijene u realnim uslovima.



prva lokacija



druga lokacija



treća lokacija

Slika p2.12. Krive veka trajanja u zavisnosti od lokacije ispitivanja;
 solarna ćelija tip A —; solarna ćelija tip D - - - -;
 solarna ćelija tip E (lokacija 1, 2, 3)

Sa slike p2.12 se vidi da ispitivane solarne ćelije znatno brže stare u realnim uslovima nego u laboratorijskim uslovima. Takođe se vidi da tokom eksploatacije u realnim uslovima dolazi do promene mehanizma starenja. Upravo ta promena dovodi do ubrzanja procesa starenja. Do ove promene dolazi, najverovatnije, usled tehničkih naprezanja kojima su izložene solarne ćelije tokom eksploatacije. Takvo tumačenje je potvrđeno ispitivanjem krivih veka trajanja u laboratorijskim uslovima uz promenu ambijentalne temperature u

skladu sa uobičajenim promenama sezonskih temperatura karakterističnih za redne uslove ispitivanja. Različita brzina starenja u zavisnosti od tipa solarne ćelije i lokacije se može objasniti tehnološkim postupkom izrade solarnih ćelija i izloženosti raznih lokacija temperaturnim promenama (dominantno ruži vetrova pošto je grad Beograd poznat po hladnim i toplim vetrovima).

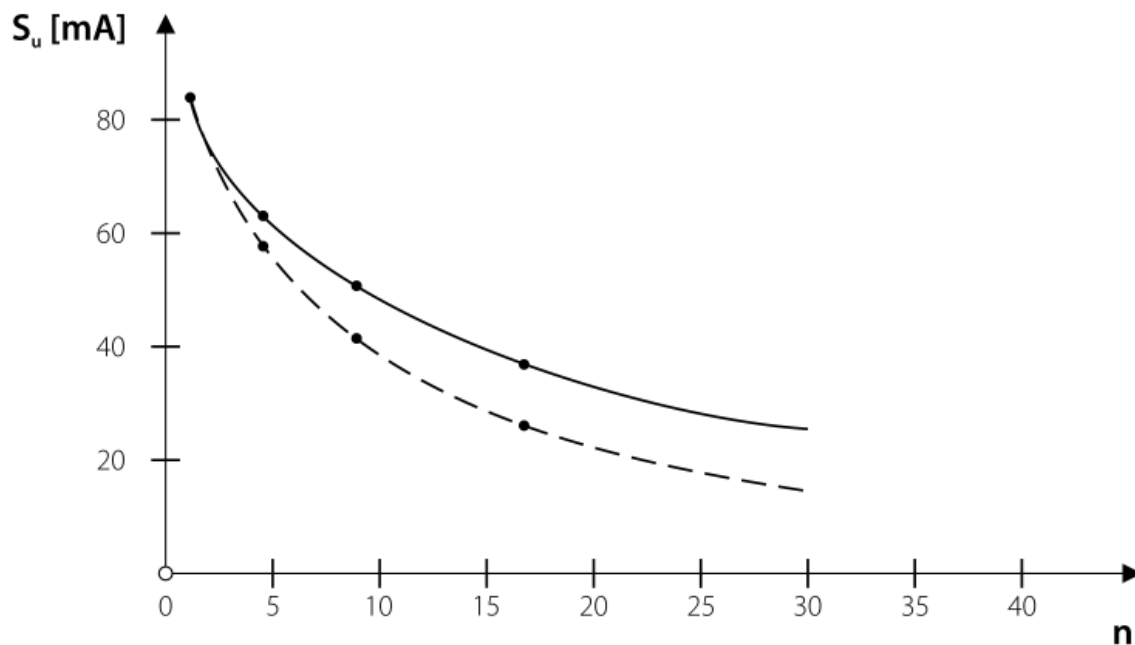
Veća brzina starenja solarnih ćelija u realnim uslovima se najbolje izražava preko odgovarajućeg eksponenta veka trajanja (tabela p2t.7).

Tabela p2t.7. Brzina starenja solarnih ćelija po tipu i po poziciji u realnim uslovima preko odgovarajućeg eksponenta veka trajanja

	tip ćelije		
eksponent veka trajanja	10,3 A	9,1 D	8,1 E
	pozicija 1		
	tip ćelije		
eksponent veka trajanja	9,8 A	8,7 D	7,8 E
	pozicija 2		
	tip ćelije		
eksponent veka trajanja	9,3 A	8,4 D	7,3 E
	pozicija 3		

2.d. Provera zakona uvećanja za solarne ćelije u laboratorijskim uslovima

Na slici p2.13 prikazana je zavisnost minimalne struje iz jednog panela dobijene delenjem minimalne struje paralelne veze dva, četiri, deset i dvadeset paralelno vezanih panela sa brojem panela. Na istoj slici je data i teoretski odgovarajuća teoretski očekivana kriva dobijena primenom izraza 5.17.



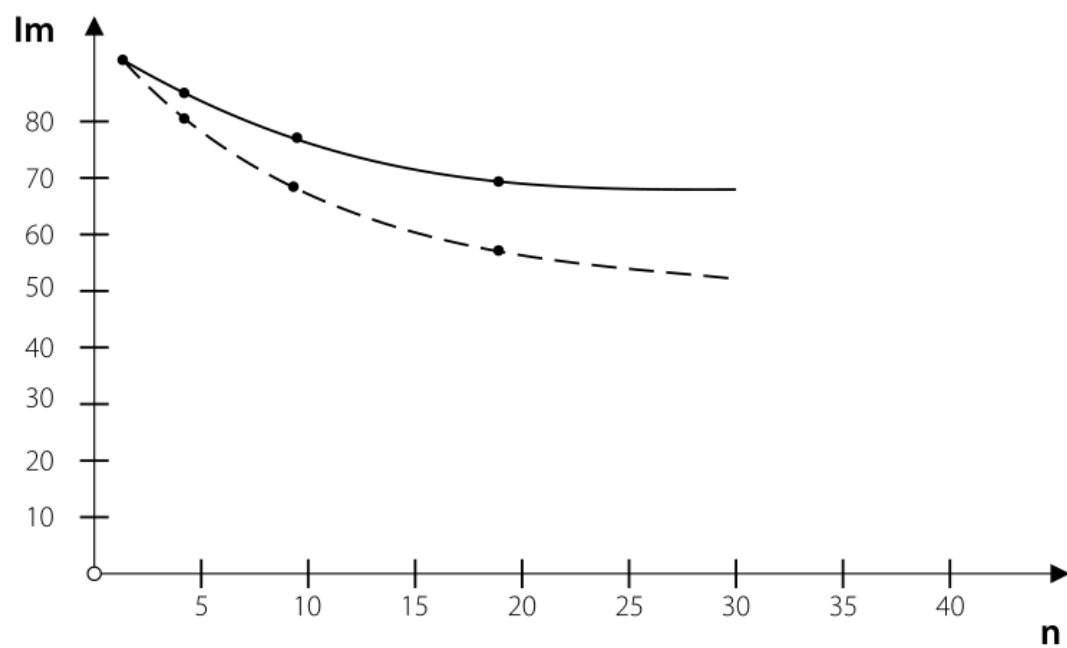
Slika p2.13. Standardno uvećanje u zavisnosti od uvećanja

— fitovana kriva $k = 0,2125$

- - - - - procenjena kriva prema $k = 0,3895$

• dobijene vrednosti standardnog odstupanja eksperimentalno

Na slici p2.14 prikazana je zavisnost standardnog odstupanja minimalne struje (normirane na jedan panel) u zavisnosti od broja panela. Na istoj slici je data odgovarajuća teoretska očekivana kriva dobijena primenom izraza (5.17).



Slika p2.14. Minimalna struja u zavisnosti od uvećanja

- fitovana kriva $k = 0,127$
- - - - - procenjena kriva $k = 0,251$
- dobijene vrednosti eksperimentom

3.a. Potvrda firme „Kuća Mont“ o nisko-energetskim (prvi, drugi, treći, četvrti objekat) Objektima



Поштована Весна,

Направљене ниско-енергетске куће налазе се на следећим адресама:

Објект 1. – породична кућа

Локација 1. - Улица миљаквачки виногради бр.39, КП 3/214 (КП-катастарска парцела), КО Ресник (КО-катастарска општина), Општина Раковица, Београд.

Објект 2. – породична кућа

Локација 2. – Улица Саве Ковачевића бр.29А, КП 690/1 (КП-катастарска парцела), КО Крњача (КО-катастарска општина), Општина Палилула, Београд.

Објект 3. – породична кућа

Локација 3. – Улици Мартина Палушке бр.3, КП 302, КО Крњача, Општина Палилула, Београд.

Објект 4. – породична кућа

Локација 4. – Улици Милована Глишића бр.14, КП25/41, КО Рвати, Општина Обреновац, Београд.

У прилогу су дате:

- слике наведених ниско-енергетских објеката,
- опис материјала уграђених у наведене ниско-енергетске објекте.

Монтажне куће

Кућамонт

Давидо Симић



3.b. Karakterizacija nisko-energetskih Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat), korišćenih u istraživačkom delu doktorske teze

Prvi Objekat – porodična kuća

Lokacija 1. – Prvi Objekat se nalazi u Ulici miljakovački vinogradi br.39, KP 3/214 (KP-katastarska parcela), KO Resnik (KO-katastarska opština), Opština Rakovica. Objekat 1 je izgrađen po svim standardima, potrebnim, za nisko-energetske uslove.



Slika p3.1. Objekat 1, Opština Rakovica

Drugi Objekat – porodična kuća

Lokacija 2. – Drugi Objekat se nalazi u Ulici Save Kovačevića br.29A, KP 690/1 (KP-katastarska parcela), KO Krnjača (KO-katastarska opština), Opština Palilula.



Slika p3.2. Objekat 2, naselje Krnjača, Opština Palilula

Treći Objekat – porodična kuća

Lokacija 3. – Treći Objekat se nalazi u Ulici Martina Paluške br.3, KP 302, KO Krnjača, Opština Palilula.



Slika p3.3. Objekat 3, naselje Krnjača, Opština Palilula

Četvrti Objekat – porodična kuća

Lokacija 4. – Četvrti Objekat (slika 4.4) se nalazi u Ulici Milovana Glišića br.14, KP25/41, KO Rvati, Opština Obrenovac.



Slika p3.4. Objekat 4, Opština Obrenovac

Zidovi niskoenergetske kuće su odlično izolovani. Debljina izolacije je 25 do 35cm. Izolacija se sastoji od slojeva mekopresovane kamene vune i stiropora. Slojevi izolacije zaštićeni su od prodora vode i vlage posebnom folijom.

Jedna od bitnih odlika niskoenergetskih kuća je ugradnja stolarije sa niskoemisionim staklima, odnosno dvostruko ili trostruko staklo, gde je šupljina između stakala ispunjena plemenitim gasom argonom, a stakla su premazana niskoemisionim premazima koji sprečavaju gubitak toplote. Preporuka za ugradnju stolarije su PVC ili aluminijumska stolarija sa termoprekidom, visokog kvaliteta. Ovakav sistem gradnje omogućava minimalne promene i konstantnost temperature u svim prostorijama kuće. Sveže u letnim mesecima i konstantno toplo u svim sobama i pri veoma niskim spoljnim temperaturama.

Materijal korišćen za izgradnju nisko-energetskih (prvi, drugi, treći, četvrti objekat) Objekata

Kuće su napravljene po standardu A+.

Zidovi su sa duplom ravni ili sendvič zidom ili pak sa instalacionim delom.

Slojevito, to izgleda ovako, od spolja ka unutra:

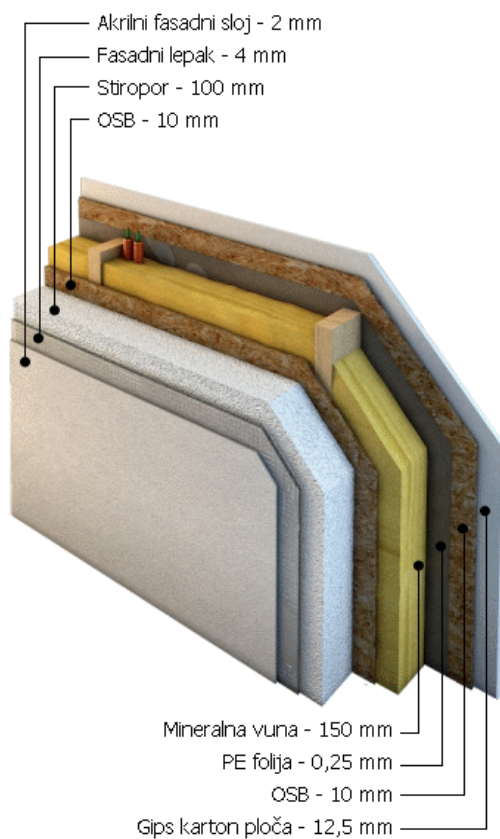
- završni vodonepropusni zaglađeni akrilni sloj granulacije 1,5 mm,
- podloga ili prajmer,
- lepak,

- mrežica,
- lepak,
- poliekspandirani grafitni 19-to gramski polesteren (stiropor), fiksiran sa niskoekspandirajućom pur penom,
- OSB tabla, debljine 12 mm,
- mineralna vuna, debljine 14 cm,
- paropropusna 90-to gramaska virtora folija,
- između se na 41,5 cm osovinski nalaze stubovi debljine 6 cm, širine 14 cm,
- OSB tabla, debljine 12 mm,
- mineralna vuna, debljine 50 mm, postavljena između instalacionih stubova, 50h50 mm, na osovinskom rastojanju od 41,5 cm,
- OSB tabla, debljine 12 mm,
- Knauf gips karton ploča, debljine 12 mm, ušrafljena direktno za OSB tablu,
- podloga ili prajmer preko gips table,
- glet masa Ljiška krupnije granulacije,(jedan sloj preko prajmera),
- glet masa finije granulacije fugen filer preko Ljiške glet mase,
- završni poludisperzivni sloj u beloj boji preko fugen filer glet mase.

Sastav zidova nisko-energetskih objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat) dat je na slici p3.5.

Termo standard

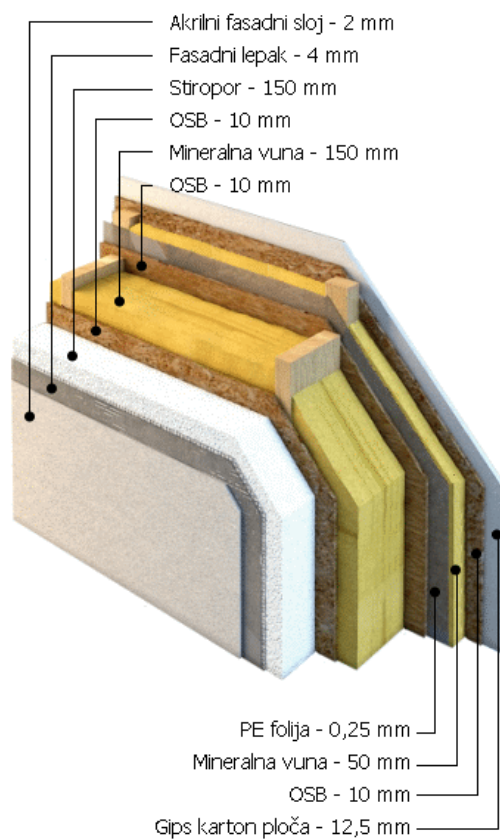
Presek spoljnog zida



Ukupna debljina zida - 288 mm
Ukupna debljina izolacije - 250 mm
Energetska klasa - **A**
EU RT2012 norma

TermoXXL standard

Presek spoljnog zida



Ukupna debljina zida - 398 mm
Ukupna debljina izolacije - 350 mm
Energetska klasa - **A+**
EU RT2020 norma

Slika p3.5. Sastav zidova nisko-energetskih Objekata (prvi, drugi, treći, četvrti objekat)

PRILOG 3

BIOGRAFIJA

1. Lični podaci

Titula, Ime i Prezime	mr Vesna Trifunović-Dragišić
Datum i mesto rođenja	02.07.1972, Beograd, Srbija
Roditelji	Zoran Trifunović, dipl.saobraćajni inženjer u penziji; Verica Trifunović, diplomirani geograf u penziji
Bračno stanje	udata, suprug Željko Dragišić, dipl.ing.građ.
Deca	Leon (2006), Adam (2008)
Adresa	Župana Pribila 13, 11273 Batajnica, Zemun, Beograd
Telefon	+38164/ 1474769
E-mail	vesnatdragisic@gmail.com

2. Obrazovanje

1979-1987	Osnovna škola „Veljko Dugošević“, Zvezdara, Beograd
1987-1991	Srednja škola „Građevinsko-tehnička škola“, Zvezdara, Bgd
1991-1993	Saobraćajni fakultet, Bgd, (položeni ispiti iz 1. i 2. god.)
1993-1996	Visoka građevinsko-geodetska škola, Zvezdara, Beograd
2003-2005	Fakultet „Union“, Beograd
2004-2008	Magistarske studije na Tehničkom fakultetu, u Novom Sadu, smer-savremena arhitektura i urbanizam
2012	Upisala doktorske studije na Arhitektonsko-građevinsko-geodetskom fakultetu u Banja Luci

3. Jezik

Aktivno znanje	engleskog jezika
----------------	------------------

4. Profesionalna i stručna biografija

Od 2006. godine je angažovana u nastavi u Visokooj građevinsko-geodetskoj školi, u Hajduk Stankovoj br.2, u Beogradu; u nastavi na osnovnim studijama, na predmetima: Arhitektonske konstrukcije 1 i 2; Građevinske konstrukcije 1 i 2; na specijalističkim studijama na predmetima: Zaštita graditeljskog nasleđa,

od 2011

samostalni predavač na predmetima osnovnih studija

2009-2012

predavala na specijalističkim studijima

2001-2002

GP „PARTIZANSKI PUT“

od marta 2001.god. do 31.07.2002. – izgradnja hale na
pristaništu Luke Beograd

- Izrada objekta tj. hale,
- Praćenje ugovorenih uslova sa dobavljačima na kvartalnom i mesečnom nivou i izrada boniteta, izrada uporednih analiza za uslove koji su ugovoreni, projekcija i organizacija budućih boniteta u delu planiranja periodičnog rezultata
- Kontrola kvaliteta betona iz betonske baze
- Kontrola i usklađivanje postojećih resursa sa organizacijom rada
- Predlozi i izmene samog projekta u dogovoru sa nadzornim organom.

2000-2001

GP “PARTIZANSKI PUT“

od aprila 2000.god. do januara 2001.god.– izgradnja objekta
(sa kuhinjom), u okviru KBC „Bežanijska kosa“, koja je
obuhvatala sledeće radove:

- Izrada objekta sa kuhinjom,
- Praćenje ugovorenih uslova sa dobavljačima na kvartalnom i mesečnom nivou i izrada boniteta, izrada uporednih analiza za uslove koji su ugovoreni, projekcija i organizacija budućih boniteta u delu planiranja periodičnog rezultata
- Kontrola kvaliteta betona iz betonske baze
- Kontrola i usklađivanje postojećih resursa sa organizacijom rada
- Predlozi i izmene samog projekta u dogovoru sa nadzornim organom.

5. Permanentna edukacija

Auto CAD 14

Archi CAD

6. Profesionalna naučna biografija

Naučni radovi:

2008

V.Trifunović-Dragišić; „Staklene fasade u savremenoj arhitekturi“, magistarski rad odbranjen je na Fakultetu tehničkih nauka , Univerzitet u Novom Sadu, 17.11.2008.

Radovi sa konferencija i skupova

1. **V.Trifunović-Dragišić; PHOTOVOLTAIC SOLAR SYSTEM (PSS) FOR ELECTRICAL ENERGY PRODUCTION FROM SOLAR RADIATION ON THE ROOF OF THE EXISTING BUILDING "APM PRINT"**, CONFERENCE PROCEEDINGS, 5th INTERNATIONAL CONFERENCE CONTEMPORARY ACHIEVEMENTS IN CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF CIVIL ENGINEERING SUBOTICA 2017.;21 April 2017.; pp: 48, ISBN 978-86-80297-68-2, UDK: 621.383:620.91.
2. **V.Trifunović-Dragišić; PV-SUPPORTED GRIDS IN DEVELOPING COUNTRIES**, Društvo za geotehniku u bosni i Hercegovini, NAUČNO_STRUČNI SIMPOZIJUM **GEO-EXPO 2014: „TEHNOLOGIJA I MATERIJALI I STRATEGIJA RAZVOJA GEOTEHNIKE“**, 23-24 Maj 2014, Mostar, Bosna i Hercegovina; str. 76-80, ISSN 23034262.
3. **V.Trifunović-Dragišić; PHOTOVOLTAIC WATER MANAGEMENT**, 14th International Scientific Conference VSU 2014, University of Structural Engineering and Architecture Lyuben Karavelov, Bulgaria, Sofia, june 5-6 2014.; ISSN 1314-071X, Vol. II.
4. **V.Trifunović-Dragišić; DRUGA I TREĆA GENERACIJA STAKALA**, VI Naučna konferencija: „Zaštita prirodnih resursa kroz zaštitu životne sredine u urbanim sistemima“, UIB, 16. maj 2014.; str. 201-210, ISBN 978-86-915671-2-5.
5. **V.Trifunović-Dragišić; QUALITY ASSURANCE OF PV MODULES**, JOURNAL OF FACULTY OF CIVIL ENGINEERING, Special edition, INTERNATIONAL CONFERENCE CONTEMPORARY ACHIEVEMENTS IN CIVIL ENGINEERING 24-25 April 2014.;Subotica; pp. 155, ISSN 0352-6852; e-ISSN 2334-9573.
6. **V.Trifunović-Dragišić; THE MECHANICAL PROPERTIES OF SILICON WAFERS AND ADDITIONAL CONTROL TO IMPROVE QUALITY**; 5TH International Conference "Civil Engineering – Science and Practice", GNP 2014, in Žabljak, Montenegro, 17-21 February 2014., *University of Montenegro, Faculty of Civil Engineering Podgorica*, pp: 1147-1153, ISBN 978-86-82707-23-3.
7. **V.Trifunović-Dragišić; SILICON SOLAR WAFERS AND CELLS**, 15th INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF MASE , STRUGA, 18-21 SEPTEMBER 2013, (ST-27 Book of abstracts, pp. 161-162), ISBN 9989-9785-1-9.
8. **V.Trifunović-Dragišić, Z. Živković; BREAKAGE ISSUES IN SILICON SOLAR WAFERS AND SOLAR CELLS**; 2nd International Scientific Meeting: STATE AND TRENDS OF CIVIL ENGINEERING-GTZ 2012 and 2nd Conference GEO-EXPO 2012, PROCEEDINGS 1.PART, (Tuzla, 7-9 June 2012.), Tuzla, 7-9 Novemver 2012, pp. 169-176, ISBN 9789958628160.

9. **V.Trifunović-Dragišić; HOLISTIC PHOTOVOLTAICS DESIGN;** 4TH International Conference "Civil Engineering – Science and Practice", GNP 2012, in Žabljak, Montenegro, 20-24 February 2012., *University of Montenegro, Faculty of Civil Engineering Podgorica*, pp: 1873-1880, ISBN 978-86-82707-21-9.

Naučni rad objavljen u domaćem časopisu

1. **V.Trifunović-Dragišić, M Stojanović, M.Stanković, REVIEW OF PHOTOVOLTAIC CONVERSION OF SOLAR ENERGY,** IZGRADNJA-72(2018), broj 11-12, str.598-600, ISSN 0350-5421, UDK 624+71+72(05)

Naučni rad (SCI lista)

1. **V.Trifunović-Dragišić, M.Stanković, D.Brajović, N.Kartalović, ESTIMATION OF THE LIFETIME OF SOLAR CELLS IN REAL CONDITIONS USING ACCELERATED AGING UNDER THE INFLUENCE OF NEUTRON AND GAMMA RADIATION,** *Nuclear Technology and Radiation Protection, Volume 34, No.3., (September 2019.),* (Priložena potvrda da je rad prihvaćen i da će biti objavljen)

05.09.2019.

mr Vesna Trifunović-Dragišić.

2. Potvrda urednika časopisa NT&RP da je naučni rad prihvaćen i da će biti objavljen



Nuclear Technology & Radiation Protection Journal



Rodoljub Simović
Editor-in-Chief
Vinča Institute of Nuclear Sciences
P. O. Box 522, 11001 Belgrade, Serbia

Subject: NT&RP - Paper accepted
Date: June 5, 2019
From: Rodoljub Simović <simovier@vin.bg.ac.rs>
To: Dr. Vesna Trifunović-Dragišić <vesnatdragisic@gmail.com>

Title: ESTIMATION OF THE LIFETIME OF SOLAR CELLS IN REAL CONDITIONS
USING ACCELERATED AGING UNDER THE INFLUENCE OF NEUTRON
AND GAMMA RADIATION

Authors: Vesna TRIFUNOVIĆ-DRAGIŠIĆ, Milenko STANKOVIĆ,
Dragan BRAJOVIĆ, and Nenad KARTALOVIĆ

Dear Dr. Trifunović-Dragišić,

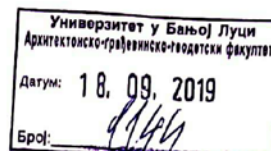
Your manuscript has now been accepted for publication in NUCLEAR TECHNOLOGY & RADIATION PROTECTION and will be printed in Vol. XXXIV, No. 3 (September 2019).

Additionally, within the next twelve weeks you will receive the proofs of your paper. Please do check them carefully for any misprints or errors.

Yours sincerely

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Rodoljub Simović'.

Rodoljub Simović
Editor-in-Chief NT&RP



Образац-3

УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
АРХИТЕКТОНСКО-ГРАЂЕВИНСКО-ГЕОДЕТСКИ ФАКУЛТЕТ



ИЗВЈЕШТАЈ
о оцјени урађене докторске дисертације

І ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ

На основу члана 54. Статута Универзитета у Бањој Луци, ННВ-е Архитектонско-грађевинско-геодетског факултета, је на својој 10. сједници, одржаној дана 5.9.2019. године, донијело Одлуку број 14/3.1064/19, о именовању Комисије за оцјену и одбрану докторске дисертације под називом: **Материјализација фасада ниско-енергетских објеката**, кандидата мр Весне Трифуновић-Драгишић, у саставу:

1. Проф. др Горан Ћирић, ужа научна област *Организација и технологија грађења и менаџмент у грађевинарству*, Универзитет у Новом Саду; Факултет техничких наука – предсједник;
2. Проф. др Миленко Станковић, ужа научна област *Архитектонско пројектовање*, Универзитет у Бањој Луци; Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет – ментор и члан;
3. Проф. др Љубиша Прерадовић, ужа научна област *Рачунарске науке*, Универзитет у Бањој Луци; Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет – члан.

ІІ ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

- 1) Име, име једног родитеља, презиме: Весна, Зоран, Трифуновић-Драгишић;
- 2) Датум рођења, општина, држава: 2.7.1972. године у Београду, Општина Савски венац, Република Србија;
- 3) Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука Нови Сад; област: Архитектура, смјер: *Савремена архитектура и урбанизам*; стечено звање: магистар техничких наука из области архитектуре
- 4) Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука Нови Сад; Назив магистарске тезе: *Стаклене фасаде у савременој архитектури*, датум одбране: 17.11.2008. године и стечено звање: *магистар техничких наука из области архитектуре*
- 5) Научна област из које је стечено научно звање магистра наука: Архитектура
- 6) На основу члана 148. Закона о високом образовању (Сл. гласник Републике Српске, број: 73/10, 104/11 и 84/12) и члана 33, Сенат Универзитета у Бањој Луци на 6. сједници одржаној дана 8.10.2012. године донио је Одлуку број: 02/04-3.2465-83/12 и дао сагласност на Извјештај о оцјени услова кандидата и подобности теме за израду докторске дисертације, под називом: *Материјализација фасада ниско-енергетских објеката*, кандидата мр Весна Трифуновић-Драгишић. Дана 27.9.2018. године. Сенат Универзитета у Бањој Луци је на 28. сједници донио Одлуку о продужењу року за одбрану докторске дисертације бр. 02/04-3.2536-105/18 до 30.9.2019. године.



Scanned with
CamScanner

III УВОДНИ ДИО ОЦЈЕНЕ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

На основу члана 148. Закона о високом образовању (Сл. гласник Републике Српске, број: 73/10, 104/11 и 84/12) и члана 33, Сенат Универзитета у Бањој Луци на 6. сједници одржаној дана 08. 10. 2012. донио је Одлуку број: 02/04-3.2465-83/12 и дао сагласност на Извјештај о оцјени услова кандидата и подобности теме за израду докторске дисертације, под називом: *Материјализација фасада ниско-енергетских објеката*, кандидата мр Весна Трифуновић-Драгишић. Дана 27. 9. 2018. год. Сенат Универзитета у Бањој Луци је на 28. сједници донио Одлука о продужењу року за одбрану докторске дисертације бр. 02/04-3.2536-105/18 до 30. 9. 2019. године.

Докторска дисертација, кандидата мр Весна Трифуновић-Драгишић, написана је на 137 страна, односно са прилозима 179 страна, садржи: слика 45, са прилозима 47; табела шест, са прилозима 13; један дијаграма и цитиране литературе 146.

Докторска дисертација обухвата шест поглавља, и то:

ПОГЛАВЉЕ 1		
УВОДНА РАЗМАТРАЊА		1
1.1.	Претходна анализа информација о мотиву, садржају и проблему истраживања	1
1.2.	Предмет и обухват истраживања	6
1.3.	Циљеви и задаци истраживања	7
1.4.	Полазне хипотезе у истраживању	7
1.5.	Научне методе истраживања	8
1.6.	Генерална структура проведених истраживања	10
1.7.	Научна оправданост и очекивани резултати проведених истраживања	12
ПОГЛАВЉЕ 2		
ПРИМЕНА ФОТОНАПОНСКИХ (ФН) СИСТЕМА НА ЗГРАДАМА У УРБАНИМ СРЕДИНАМА У ЕВРОПској УНИЈИ И У СРБИЈИ		13
2.1.	Увод	13
2.2.	Примена соларних система	14
2.3.	Примена фотонапонских (ФН) система у градовима	16
2.4.	Примери добре праксе примене соларних ФН система у градовима ЕУ	18
2.4.1.	Фотонапонски (ФН) системи у урбаним политикама (PV-UP-SCALE)	18
2.4.1.1.	Студија случаја-Стамбени објекти за соларну енергију у Северној Рајни-Вестфалији (NRW)	19
2.4.2.	Програм IEA PVPS (IEA Photovoltaic Power System Program (PVPS))	21
2.4.2.1.	Пројекат соларног стамбеног комплекса „Pal Town Josai-no-Mori”, у Ota City, Gunma Prefecture у Јапану (IEA-PVPS-Task 10)	22
2.4.2.2.	Пројекат соларног стамбеног комплекса La Darnaise, Grand-Lyon конурбације у Француској, (IEA-PVPS-Task 10)	24
2.5.	Електроенергетика и искоришћеност обновљивих извора енергије у Републици Србији	25
2.6.	Параметри битни за пројектовање објеката засновани на принципима биоклиматске архитектуре	28
2.6.1.	Одабир локације	29
2.6.2.	Конфигурација терена	31
2.6.3.	Оријентација	32
2.6.4.	Изложеност ветру	33
2.6.5.	Вегетација	34
ПОГЛАВЉЕ 3		
СТРУКТУРА ПОЛУПРОВОДНИЧКИХ СОЛАРНИХ КОМПОНЕНАТА ЗА ФОТОНАПОНСКУ (ФН) КОНВЕРЗИЈУ		36
3.1.	Увод	36
3.2.	Карактеристике полупроводничких материјала	37
3.3.	Принципи рада и основне излазне карактеристике фотонапонске соларне ћелије	41
3.3.1.	Историја фотонапонске конверзије	41

3.3.2.	Принцип рада силицијумске соларне ћелије	41
3.3.3.	Зависност струје кратког споја и напона отвореног кола соларне ћелије од основних физичких параметара	45
3.3.3.1.	Густина струје кратког споја (J_{sc}) соларне ћелије	47
3.3.3.2.	Зависност напона отвореног кола (V_{oc}) соларне ћелије	52
3.3.3.3.	Зависност ефикасности (η) од фундаменталних параметара соларних ћелија	53
3.3.3.4.	Зависност фактора испуне (ff) од фундаменталних физичких параметара соларне ћелије	57
3.4.	Соларне фотонапонске технологије	60
3.4.1.	Прва генерација соларних ћелија: соларне ћелије кристалног силицијума	62
3.4.2.	Друга генерација соларних ћелија: танкослојне соларне ћелије	63
3.4.3.	Трећа генерација соларних ћелија	65
3.4.3.1.	Концентрисани ФН (CPV) системи	65
3.4.3.2.	Соларне ћелије осетљиве на боју	66
3.4.3.3.	Органске соларне ћелије	67
3.4.3.4.	Развој нових соларних ћелија	68
3.4.4.	Поређење соларних фотонапонских ћелија	68
ПОГЛАВЉЕ 4		
МАТЕРИЈАЛИЗАЦИЈА НИСКО-ЕНЕРГЕТСКИХ ОБЈЕКТА ФН СОЛАРНИМ ПАНЕЛИМА		70
4.1.	Увод	70
4.2.	Параметри за пројектовање модела изабраних Објеката-први, други, трећи, четврти објекат	71
4.2.1.	Клима Београда	72
4.2.2.	Геопросторне карактеристике ниско-енергетског Објекта-први објекат-Општина Раковица	73
4.2.3.	Геопросторне карактеристике ниско-енергетских Објеката-други и трећи објекат-насеље Крњача, Општина Палилула	74
4.2.4.	Геопросторне карактеристике ниско-енергетског Објекта-четврти објекат-Општина Обреновац	76
4.2.5.	Анализа геопросторних карактеристика ниско-енергетских Објеката (први, други, трећи, четврти објекат) у односу на параметре биоклиматске архитектуре	78
4.2.6.	Опис енергетске оптимизације ниско-енергетских Објеката-први, други, трећи, четврти објекат	79
4.3.	Одређивање снаге ФН монокристалних силицијумских (sc-Si) соларних панела на фасадама ниско-енергетских Објеката-први, други, трећи, четврти објекат	81
4.3.1.	Снага ФН монокристалних силицијумских (sc-Si) соларних панела постављених на кровове Објеката (први, други, трећи, четврти објекат) за сезону 2017/18.	90
4.3.2.	Снага ФН монокристалних силицијумских (sc-Si) соларних панела постављених на фасаде Објеката (први, други, трећи, четврти објекат) за сезону 2017/18.	93
4.3.3.	Снага ФН монокристалних силицијумских (sc-Si) соларних панела са стиропором постављених на кров Објеката (први, други, трећи, четврти објекат) за сезону 2017/18.	95
4.3.4.	Снага ФН монокристалних силицијумских (sc-Si) соларних панела са стиропором постављених на фасаде Објеката (први, други, трећи, четврти објекат) за сезону 2017/18.	97
4.3.5.	Промена снаге ФН монокристалне силицијумске (sc-Si) соларне ћелије, у оквиру ФН соларних панела, при отвореним контактима температуре за ниско-енергетске Објекте (први, други, трећи, четврти објекат) за сезону 2017/18.	100
4.3.6.	Анализа максималне снаге монокристалне силицијумске (sc-Si) соларне ћелије у материјализацији ниско-енергетских Објеката (први, други, трећи, четврти објекат) за сезону 2017/18.	101
4.3.7.	Анализа максималне снаге монокристалних силицијумских (sc-Si) соларних панела у материјализацији ниско-енергетских Објеката (први, други, трећи, четврти објекат) по годишњим добима, мереним у току 2017/18. године	108
4.4.	Примена кадмијум-телурида (CdTe) и бакар индијум диселенида (CIS) у материјализацији одабраног модела ниско-енергетског Објекта-први објекат, за сезону 2017/18.	110
4.4.1.	Примена соларне ћелије-кадмијум телурид (CdTe) на моделу-први Објекат, за сезону 2017/18.	110
4.4.2.	Примена соларне ћелије-бакар индијум диселенид (CIS) на моделу-први Објекат, за сезону 2017/18.	113
4.4.3.	Анализа максималне снаге кадмијум телурида (CdTe) и бакар индијум диселенида (CIS) у материјализацији модела ниско-енергетског Објекта-први објекат за сезону 2017/18.	115
ПОГЛАВЉЕ 5		
МАТЕМАТИЧКИ АЛГОРИТМИ КОРИШЋЕНИ ЗА ОБРАДУ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ РЕЗУЛТАТА УВЕЋАЊА ВЕРОВАТНОЋЕ И КРИВЕ ВЕКА ТРАЈАЊА		117
5.1.	Увод	117
5.2.	Функција расподеле времена минималног напона, функција расподеле минималног распона на систему фотонапонских панела	117

5.3.	Закон увећања вероватноће на систему фотонапонских панела	120
ПОГЛАВЉЕ 6		
ЗАКЉУЧАК		
ПОГЛЕД У БУДУЋНОСТ		123
ЛИТЕРАТУРА		125
ПОПИС СЛИКА, ТАБЕЛА, ДИЈАГРАМА		134
ПРИЛОЗИ		
ПРИЛОГ 1		
ЕКСПЕРИМЕНТ		138
1.а.	Увод	138
1.б.	Лабораторијско мерење струјно-напонских карактеристика	139
1.в.	Мерење струјно-напонских карактеристика у реалним условима	141
1.г.	Лабораторијско мерење експонента века трајања соларних ћелија	142
1.д.	Одређивање кривих века трајања и експеримената века трајања у реалним условима	142
1.ђ.	Провера важења закона увећања за соларне ћелије у лабораторијским условима	143
1.е.	Обрада резултата мерења	143
ПРИЛОГ 2		
РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА		144
2.а.	Увод	144
2.б.	Струјно-напонске карактеристике соларних ћелија испитане под лабораторијским условима	144
2.б.1.	Анализа ефекта старења соларних ћелија типа: А, D, E, F, од времена, опадањем струје и порастом унутрашње отпорности уз параметре: флукс беле светлости и монохроматске светлости СОХ лампе, под лабораторијским условима	146
2.в.	Струјно-напонске карактеристике соларне ћелије под реалним условима	147
2.г.	Одређивање кривих века трајања и експонента века трајања соларних ћелија у лабораторијским условима	151
2.д.	Одређивање кривих века трајања и експонента века трајања соларних ћелија у реалним условима	160
2.ђ.	Провера закона увећања за соларне ћелије у лабораторијским условима	163
3.а.	Потврда фирме „Кућа Монт“ о ниско-енергетским (први, други, трећи, четврти објекат) Објектима	165
3.б.	Карактеризација ниско-енергетских (први, други, трећи, четврти објекат) Објеката, коришћени у истраживачком делу докторске тезе	166
ПРИЛОГ 3		
БИОГРАФИЈА АУТОРА		171
1.	Биографија аутора	171
2.	Потврда уредника часописа NT&RP да је научни рад (SCI листа) прихваћен и да ће бити објављен	175
ИЗЈАВЕ АУТОРА		176
1.	Изјава о ауторству	176
2.	Изјава о коришћењу	177
3.	Изјава о идентичности штампане и електронске верзије докторске тезе	179

Докторска дисертација разрађена је у складу са захтијеваном методологијом – Одлуком Универзитета у Бањој Луци, започиње Сажетком, прати је списак скраћеница и шест поглавља истраживања, три прилога, списак литературе, биографија аутора и изјаве.

Прво поглавље, носи назив: *Уводна разматрања* и обухвата претходне анализе информација о мотиву, садржају и уоченим проблемима, које је аутор третирао као изазове. Слиједи Предмет и обухват истраживања. Главни циљ са подциљевима и задаци истраживања, су логичан слијед активности. Затим су дефинисане полазне хипотезе и научне методе у истраживачком процесу. Детаљно је образложена генерална структура проведених истраживања. Посебно је истакнута научна оправданост докторске дисертације и очекивани резултати проведених истраживања, уз најаву другог поглавља.

Друго поглавље носи наслов *Примена фотонапонских (ФН) система на зградама у*

урбаним срединама у ЕУ и Србији. Ово поглавље почиње уводним дијелом у коме се разматра имплементација ФН система у градовима и урбаним срединама. Дат је детаљан преглед примјене фотонапонских (ФН) система на објектима у урбаним срединама у ЕУ. Представљене су студије случаја у градовима ЕУ: Пројекат – Стамбени објекти за соларну енергију Köln-Bocklemünd, у Северној Рајни-Вестфалији (NRW); Пројекат стамбеног комплекса „Pal Town Josai-no-Mori”, у Ota City, Gunma Prefecture у Јапану; Пројекат La Darnaise, Grand-Lyon конурбације у Француској. Слиједи објашњење стања и примјене фотонапонских система у Србији. Наведени су и детаљно објашњени параметри значајни за пројектовање ниско-енергетских стамбених објеката уз уважавање принципа биоклиматске архитектуре. У овом поглављу прикупљена су искуства о интеграцији соларних панела у фасадне системе и дате смјернице, закључна разматрања, као полазна основа за треће поглавље.

Треће поглавље *Структура полупроводничких соларних компонената за фотонапонску (ФН) конверзију*, има за циљ да уведе и детаљно опише основе микроскопских и макроскопских процеса у полупроводничким компонентама за фотонапонску конверзију енергије. Оно има за циљ да помогне у бољем разумијевању концепције експерименталних поступака и извора одговарајуће комбиноване мјерне несигурности. Подијељено је на четири потпоглавља. Прва два потпоглавља су Увод и Карактеристике полупроводничких материјала у којима се разматрају енергетске структуре полупроводничких материјала уз навођење и појашњавање појмова валентне, забрањене и проводне зоне. Треће потпоглавље Принципи рада и основне излазне карактеристике фотонапонске соларне ћелије појашњава зависност струје кратког споја и напона отвореног кола соларне ћелије од основних физичких параметара, анализира густину струје кратког споја, прати напон отвореног кола, зависност ефикасности од фундаменталних параметара соларних ћелија, као и зависност фактора испуне од фундаменталних физичких параметара. На бази горе изложеног разјашњено је познавања спектра бијеле (сунчеве) свјетлости, објашњен избор материјала за израду соларних ћелија (Соларне фотонапонске технологије (ФН)) које раде на принципу р-п споја. У четвртом потпоглављу је објашњено функционисање и примјена соларних фотонапонских технологија (ФН), уз анализу три генерације соларних ћелија, концентрисаних ФН технологија, органских ћелија и соларних ћелија осјетљивих на боју. Такође је дат и приказ нових и настајућих концепата соларних ћелија, као и приказ поређења соларних фотонапонских технологија. Утврђене су смјернице и закључна разматрања за треће поглавље, као полазна основа за најаву четвртог поглавља.

Четврто поглавље *Материјализација ниско-енергетских објеката ФН соларним панелима* почиње уводом у којем се говори о разлозима примјене ФН соларних панела на стамбено-пословне објекте у циљу постизања веће уштеде енергије и комфора становања, уз провјеру исплативости њихове примјене. Извршена је анализа геопросторних карактеристика четири карактеристична ниско-енергетска објекта, према принципима биоклиматске архитектуре, уз енергетску оптимизацију истих. На основу њихових локалитета, одређени су климатски услови потребни за пројектовање соларних панела на фасадама наведених објеката. Одговарајућим софтверским пакетом извршено је постављање соларних панела на сва четири ниско-енергетска објекта (први, други, трећи и четврти Објекат) на сљедеће начине: соларни панели постављени на кровове објеката; соларни панели постављени на фасаде објеката; на кровове објеката уз постављени термички материјал, стиропор, између соларних панела и крова; соларни панели постављени на фасаде објеката уз стиропор, постављен између соларних панела и фасаде објеката. У трећем потпоглављу софтверским пакетом срачунате (добијене) су вриједности снаге соларних панела (ФН монокристална силицијумска ћелија – одабрани материјал за соларну компоненту из прве генерације технологија) и одређен је дијаграм

промјене снаге соларне ћелије при отвореним контактима температуре за четири ниско-енергетска објекта. Извршена је табеларна анализа промјене снаге соларних панела за сва четири објекта. У четвртом потпоглављу провјерена је могућност веће ефикасности ниско-енергетских објеката; примијењени су материјали из друге генерације соларних панела (примјена кадмијум-телурида (CdTe) и бакар индијум диселенида (CIS) у материјализацији одабраног модела ниско-енергетског објекта) за добијање снаге на једном, карактеристичном објекту (први објекат), чије су вриједности анализиране и упоређиване са резултатима монокристалних силицијумских соларних панела. Утврђене су смјернице и закључна разматрања за четврто поглавље, као полазна основа за најаву петог поглавља.

У петом поглављу *Математички алгоритми коришћени за обраду експерименталних резултата увећања вероватноће и криве века трајања* обрађени су у три потпоглавља. Прво је уводни дио у коме је дат преглед математичких алгоритама примијењених на експерименталне резултате њиховог уопштовања и доношења закључака за реално димензионисану материјализацију фасаде ниско-енергетских објеката на основу мјерења помоћу добро конципираних и контролисаних модела. Слиједе још два потпоглавља: Зона увећања и крива вијека трајања соларних ћелија. Зона увећања се примјењује да би се избјегла тривијалност (тачније нетачност) претпоставке да се резултати добијени на моделу могу уопштити димензионо. Прости математички алгебарски поступак множења, односно закон о множењу независних вјероватноћа уз примјену асиметричних расподела то строго забрањује. Алгоритам одређивања кривих вијека трајања, односно експонента вијека трајања, је коришћен пошто омогућава процјену времена ефикасне примјене паралелног фотонапонског система у условима реалних експеримената. Наведени подаци су значајни за процјену економичности примјене соларних ћелија, односно соларних панела у материјализацији ниско-енергетских објеката, што је основни параметар за одлучивање да ли је реално примијенити овај фотонапонски систем. Утврђене су смјернице и закључна разматрања за пето поглавље, као полазна основа за шесто поглавље.

Поглавље шест, тј. Закључак, садржи закључна разматрања о постигнутим резултатима са нагласком на испуњење постављених циљева, доказаних хипотеза, уз истицање научног доприноса дисертације, као препоруке и смјернице за будућа истраживања у овој области.

У Прилозима један и два, су дати резултати експерименталног поступка, обрада експерименталних резултата и дискусија о резултатима добијеним усљед: одређивања струјно-напонске карактеристике соларне ћелије у лабораторијским и у реалним условима; кривих вијека трајања и експонента вијека трајања у лабораторијским и реалним условима; провјере закона увећања за соларне ћелије у лабораторијским условима.

У прилогу три, дати су биографски подаци докторанта и изјаве о ауторству, о коришћењу и изјава о истовјетности штампане и електронске верзије докторске тезе.

IV УВОД И ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

Уочен је проблем у сталном снабдијевању електричном енергијом и начинима за континуирану дистрибуцију. Изазов у овом раду јесте трагање за рјешењима у производњи електричне енергије из обновљивих извора и континуираној дистрибуцији исте, са могућношћу интеграције фотонапонских панела у фасаде ниско-енергетских објеката у Србији.

Значајним повећањем примјене соларне енергије заправо се приближавамо стандардима Европске уније о коришћењу обновљивих извора енергије. У корист очувања животне средине, тенденција глобалне енергетике је да се све више ослања на обновљиве изворе, а све мање на исцрпиве ресурсе. Увођењем принципа „чистије“ и штедљивије производње енергената, развија се и користи све ефикаснија опрема и технологија, подстичу се пројекти широког спектра примјене, од малих домаћинстава која се прикључују на

дистрибутивну мрежу до капацитета индустријских размјера. Стратешки национални циљеви су да се расположиви обновљиви ресурси користе у производњи електричне енергије, у топланама и финалној потрошњи, као и у саобраћају. Стварањем бољих услова у области финансија, привреде и економије, а за коришћење обновљивих извора енергије, постижемо и очување одрживости енергетике уопште. У развијеним земљама се у том правцу разматра могућност изградње паметних кућа које су двосмјерно укључене у нисконапонску мрежу. Ово се односи на архитектуру високог нивоа система паметног мјерења у ширем контексту активности паметних мрежа, кућне аутоматизације, итд.

Контекст паметног мјерења обезбјеђује двосмјерни проток информација између паметних бројила и дефинисаних учесника на тржишту. Паметни системи мјерења могу постојати у контексту већих инфраструктура паметних мрежа, а такође могу и да коегзистирају са системима кућне аутоматизације. Функционални обим паметног мјерења може варирати од аутоматизације процеса прикупљања мјерних вриједности, до пуне аутоматизације и надзора нисконапонске мреже. Када је у питању мјерење електричне енергије, од посебног је значаја и омогућавање апликација „паметне мреже“, посебно са укључивањем дистрибуиране производње. На овај начин се омогућава размјена мјерних података и других информација између дистрибутивних предузећа и њихових купаца.

У докторској дисертацији испитиване су могућности унапређења енергетских карактеристика постојећих стамбених ниско-енергетских објекта у Београду. Добијени резултати важе и за друге урбане средине, уз одређена ограничења која се односе на модул насељености човјекове средине. Могућност унапређења је предмет испитивања употребе обновљивих извора енергије, односно имплементирањем (интеграцијом) соларних панела (паралелни енергетски систем) у фасадне системе стамбених нискоенергетских објеката. Прво се врши одабир соларних ћелија за експеримент, на основу проведених анализа карактеристика све три генерације савремених фотонапонских (ФН) технологија (тј. соларних ћелија). Затим се вреднују идеалне карактеристике биоклиматских параметара и климатски услови локалитета стамбених ниско-енергетских објеката. У процесу варијације позиције соларних панела, термичке изолације између панела и фасаде, те испитивање различитих материјала израђене соларне ћелије, имају значајан утицај. На основу добијене максималне снаге соларних панела увидјеће се могућност уштеда потрошње конвенционалних видова енергије. Намјера је повећати комфор боравка у унутрашњем простору, те интеграцијом соларних панела у фасадни систем омогућити додатну електричну снагу која може да утиче на економско-енергетски биланс објеката. У циљу провјере економичности понуђеног система примјењене су софистициране нуклеарне методе убрзаног старења соларних панела, што је омогућило процјену односа уложених средстава за избор система соларних панела.

Главни циљ проведених истраживања је преиспитати могућност и економску оправданост, напајања ниско-енергетских објеката соларним панелима, интергацијом у фасадне системе објеката у Србији. Искуствено су сагледане варијације биоклиматских параметара (положај ниско-енергетских објекта у односу на правац исток-запад, конфигурација терена, оријентација, изложеност вјетру, вегетација), вреднујући климатске услове локалитета ниско-енергетских објеката и варијацију позиције соларних панела, термичке изолације између панела и фасаде, те испитивање различитих материјала израђене соларне ћелије.

Као подциљ овога рада, постављено је формирање експериментално-нумеричког алгорита. Експериментално-нумерички алгоритам је заснован на статистичким методама за одређивање релевантних параметара система за фотонапонску конверзију енергије, уграђених на стамбеним објектима са малом комбинованом мјерном несигурности.

Све већи степен минијатуризације полупроводничких компонената као и појачана контаминација животне средине електромагнетним и нуклеарним зрачењем је за десетак

година изузетно актуелиzirала тему радијационе отпорности (електро-радијациона компактибилност полупроводничких компонената). Из тог разлога су вршена истраживања ове области у највећим војним и цивилним научно-истраживачким институтима. Велики дио тих резултата је публикован, осим оних који представљају војну тајну. Како је у основи сваке полупроводничке компоненте р-п спој, односно диода, а како је соларна ћелија једна врста диода, сви ти резултати се могу примијенити на проблематику у овом раду. Ту су од подједнаке важности и неки старији и нови радови с обзиром да соларна ћелија представља релативно једноставан примјер примјене усмјерачких карактеристика полупроводничких материјала. Да би се сама проблематика интеракције природног зрачења, односно контролисаног зрачења актуелног у дијелу експеримента у добро контролисаним условима, могла поредити са познатим и претходно добијеним резултатима.

Током рада је коришћена и класична уџбеничка литература и најновији доступни резултати објављени у часописима који се баве овом проблематиком. Резултати најновијих истраживања су доступни у водећим међународним часописима, који на неки начин претходе, и компактибилни су са добијеним резултатима у овој тези. *Bisquert J*, (2017), у свом раду је био у потрази за новим фотонапонским материјалима за претварање сунчеве у електричну енергију. По *Bisquertu*, човјек може почети са прилично лошом ефикасношћу, али је почетна мистерија како се уопште може извући напон, како се раздваја напон и зашто се наелектрисање ствара на електричном контакту? Стога, историјски, објашњење функционисања соларне ћелије, ослања се на транспорт носача и дјеловање електричних поља. Тако, на примјер, *Николић Д*, (2015), је у свом раду истраживао дејство гама и неутронског зрачења на усмјерачку полупроводничку структуру и показао да ова зрачења озбиљно нарушавају структуру кристалне решетке полупроводника и сходно томе деградирају све излазне карактеристике и параметре фотонапонских детектора и поред дјелимичног опоравка који се десио након озрачивања. Значајан резултат ових истраживања је запажање да неутронско озрачивање фотонапонских детектора, примијењено након гама озрачивања, доводи до дјелимичне репарације нарушене структуре полупроводника и повећања нарушених излазних карактеристика (струјно-напонска карактеристика, спектрални одзив, параметри соларне ћелије). *Feindt F*, (2016), је мјерећи струју кашњења фотонапонских силиконских сензора, одредио узрочно-последичну везу између густине електронско-шупљинских парова и енергије (фреквенције) примјењиване монохроматске свјетлости. *Kopsalis, I*, (2017), је испитивао како стабилност напона, својства сакупљања напона и тамна струја сегментираних силицијумских сензора утичу на наелектрисање и потенцијалну расподелу на површини сензора, расподелу напона у оксидним и пасивним слојевима и стања интерфејса Si – SiO₂. Да би се боље разумјели ови феномени, *Kopsalis* је мјерења на испитним структурама и сензорима прије и после зрачења и симулације за пројектовање процеса, компоненти и технолошку карактеризацију, TCAD (Technology Computer-Aided Design) симулације укључујући површинске и интерфејс ефекте, вршио у лабораторији за детекције. *Милошевић М, et. al*, (2017), су у свом раду вршили истраживање проблематике вишекритеријумске анализе у домену унапређења енергетске ефикасности постојећег грађевинског фонда, као и могућност одабира оптималног рјешења примјеном методе аналитичких хијерархијских процеса (АХП). Циљ је да се АХП методом одреде приоритетни и доминантни фактори унапређења перформанси архитектонских објеката, узимајући у обзир аспект енергетске ефикасности и утицај на животну средину, уз одговарајућу економску исплативост. *Mohammed, S. A, Hashim, E. T*, (2019), су испитивали одрживост полупроводничких компоненти у фотонапонску конверзију енергије и дошли су до закључка, употребом методе аналитичких хијерархијских процеса, да се могу добити релевантни подаци који обезбјеђују поуздане одлуке у грађевинској индустрији.

У више радова (*Farrakhov, B. F, Fattakhov, Ya. V, Galyautdinov, M. F, (2019); Sulyok, G, Summhammer, J. (2018)*) су се посветили амбијенталним условима (дејствима) примјене компонената за фотонапонску конверзију енергије и дошли до закључка да амбијентални услови значајно утичу на ефикасност те примјене, при чему су недовољно проучили, испитивали синергистичке, амбијенталне услове, што отежава примјену добијених резултата. *Donegani, E. M, (2017)*, објашњава да је нејонизирајући губитак енергије (NIEL), у расутом стању сензора, ограничавајући фактор за вијек трајања силиконских детектора. *Donegani, E. M, (2017)*, у свом раду проучава пропусно-енергетски велико оштећење у силиконским плочама п- и р-типа. Узорци су танки материјали дебљине 200 μm и материјал обогаћен кисеоником (односно расути типови материјала: MCz, стандардни или дубоко-дифузни FZ). *Cressler, J. D, (2018)*, истражује силиконски хетероструктурне уређаје, који покривају невјероватно разноврстан скуп тема, у распону од основне физике транзистора до буке, ефеката зрачења, поузданости и симулације за пројектовање процеса, компоненти и технолошку карактеризацију TCAD. Када је у питању ефикасност соларног система, аутори: *Буковић, Д, Шетрајчић, Ј. П, Вученовић, С. М, (2017)*, у раду су извршили микротеоријску анализу динамике носилаца наелектрисања међузонских прелаза у полупроводној ћелији. На основу експериментално доступних података о величини енергетског процјепца извршен је прорачун ефикасности соларне ћелије и показано је да се увођењем адекватних ултра-танких полупроводних превлака на горњим површинама, ефикасност система (концентрација носилаца наелектрисања) може повећати и до 40%. *Vengatesh, R. P, Rajan, E. S, (2016)*, су се у раду фокусирали на испитивање струје-напона (I-V) и снаге-напона (P-V) карактеристика фотонапонског модула повезаног у различитим конфигурацијама попут серије, паралелна и низ паралелна. Извршена је анализа перформанси FN модула под једноличним и неуједначеним условима као што је промјена зрачења (пролазни облаци), промјена температуре, нагомилавање прашине и промјена брзине вјетра коришћењем MATLAB-Simulink окружење. Из посматраних резултата показало се да за одређени број FN модула, конфигурације матрице утичу на максималну доступну излазну снагу и више локалних максимума се налазе у дјелимично засјењеним условима. Даље се у истраживању показало као видљиво, да је и у неуједначеним условима паралелна конфигурација FN модула израженија и добијена је максимална излазна снага. Постоје многе врсте соларних ћелија које су дизајниране и произведене у претходним деценијама како би повећале ефикасност и продуктивност соларне ћелије. *Maniam, S, Munirah, W. S. H, Wong, H. Y, Zaman, M, (2019)* су имали за циљ (истраживачке студије) испитивање интерфејса између силиконских влакана обложених молибденом и CZTS (материјал превлака су раствор бакра, цинка, коситра и сумпора), а утврђено је да силиконска влакна могу дјеловати као супстрати за соларне ћелије и да се може даље истраживање користити ако се користи као супстрат.

Што се тиче даље провјере ефикасности соларне ћелије нове технологије, *Al-Hossainy, A. F, Zoromba, M. Sh, Abdel-Aziz, M. H, Bassyoni, M, et. al, (2019)*, су истраживали карактеристике и оптичка својства произведеног материјала POAP (танки филм). Такође су и за произведену соларну ћелију (на основу POAP танког филма) Au / POAP / TiO₂ / p-Si / Al одређиване карактеристике, гдје се показало да је просјечна вриједност ефикасности претварања електричне енергије (PCE) Au / POAP / TiO₂ / p-Si / Al хетеројункционе соларне ћелије 4,28%.

Групе аутора, као на примјер (*Тасић, Н. Б, (2017); Пуреновић, Ј, (2016); Hartmann F, (2017); Hu, F, Zhao, Q, Peng, X, (2019)*), су испитивали примјене разних врста монокристалних материјала за израду соларне ћелије и добијени резултати тих испитивања су указали да одређене полупроводничке легуре употријебљене за фотонапонску конверзију енергије, могу бити енергетски ефикасније од силицијума који је најрапрострањенији у употреби. Међутим,

ти резултати имају искључиву, теоретску вриједност (карактер), пошто би практична примјена таквих соларних ћелија била неекономичнија од соларних силицијумских ћелија (укупна енергија уложена за добијање таквих компонената за добијање фотонапонске конверзије енергије примјеном других материјала, била би знатно већа од енергије која би се добила из тих материјала), па би укупни енергетски биланс тих материјала био негативан.

На основу анализираних радова који су дјелимично приказани, може се закључити да су аутори избјегавали утицај параметра времена на компоненте за фотонапонску конверзију. Са друге стране, пошто су компоненте за фотонапонску конверзију, тј. соларне ћелије, у активној употреби релативно кратко вријеме, не постоје искуствени подаци о радном вијеку ових ћелија, поготово не осим синергистичком утицају свих релевантних параметара карактеристичних за њихову експлоатацију у конкретним условима експеримента. Из тог разлога се може сматрати да је ова дисертација пионирски рад у области старења полупроводничких компонената за конверзију енергије, при чему се наравно битни физички процеси и закључци у вези њих уводе из претходних радова, а сам приступ и примијењени експериментални поступак и математички алгоритми преузети и модификовани из сличне проблематике старења електро-енергетских компонената приказаних у овом раду. Резултати који су добијени и верификовани на локалитету града Београда (Република Србија), могу да се примијене на свим локалитетима, јер су експеримент и анализирани статистички поступак независни од експерименталних података добијених за одређен локалитет.

Основни допринос тезе се састоји у рјешавању проблема поузданог старења и могућности процјене радног вијека компоненти за фотонапонску конверзију енергије. Овај допринос је постигнут захваљујући адекватној примјени статистичке методе одређивања вијека трајања произвољног система на основу праћења карактеристика квантила релевантних случајних промјенљивих репрезентативног узорка. Поред тога, у раду су дата и научно заснована тумачења процеса старења на бази фотонско-фононских интеракција. У раду је такође извршена детаљна анализа буџета мјерне несигурности и извршена је реална процјена комбиноване мјерне несигурности експеримента чиме је демонстрирано познавање ове нове области у теорији метрологије, а самим тим и дат стручни допринос.

На основу претходно реченог, јасно се може закључити да се основни добијени научни допринос састоји од развоја методе ефективног радног вијека соларне ћелије, на основу оригинално развијеног статистичког математичког алгоритма, који је у раду примијењен на локалитету града Београда, и при том има универзални карактер. У овај модел су укључени најбитнији амбијентални услови са макроскопског нивоа и дата тумачења њихових микроскопских ефеката. У том смислу је предложени поступак карактеристичан за локалитет града Београда, а строго се водило рачуна да алгоритам не буде затворен, већ да се у њега могу унијети и други амбијентални ефекти карактеристични за неке друге локалитете, тј. предложени алгоритам је отворен за надоградњу по свим елементима.

V МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД РАДА

Компоненте за фотонапонску конверзију енергије примијењиване у оквиру експерименталног дијела била су од монокристалног силицијума. Вршени су одређени експерименти поликристалним силицијумом као и другим полупроводничким легурама и једињењима енергетског процјепа око 1eV. Међутим, пошто је један од основних циљева било испитивање економске исплативости на ниско-енергетским објектима (први, други, трећи, четврти Објекат), поликристалне фотонапонске ћелије су одбачене због мале ефикасности, а полупроводничка једињења и легуре добијена инжењерингом енергетског процјепа су одбачена због неекономичности – високе цијене њихове производње, односно великог утrophка

енергије Чохаљског, која никако не би могла да се врати у комерцијалним условима за ниско-енергетске објекте (први, други, трећи, четврти Објекат).

Примијењене методе су пажљиво изабране у складу са највишим стандардним карактеристичним полупроводничким материјалима што је било могуће урадити захваљујући доброј опремљености лабораторија (опремом високе класе тачности и мале комбиноване математичке несигурности) Електротехничког факултета у Београду, Завода за физику техничких факултета у Београду и Института за нуклеарну физику „Винча“ у Београду.

Основна структура плана изнесеног у пријави тезе је задржана, али су извршена и додатна истраживања која су се показала могућим и интересантим током протеклог времена од тренутка пријаве до завршетка. Ове допуне плана рада значајно су осавремениле и унаприједиле истраживања у дисертацији.

Извршена испитивања и методе обраде добијених резултата су адекватно постављене и складу са доказима хипотезама из пријаве дисертације. Ни једно додатно испитивање не би могло значајније да утиче на дефинисани и очекивани резултат. Наравно, то нипошто не значи да се истраживања у овој области не могу наставити и да не могу донијети нове софистицираније научне резултате којима ће резултати из дисертације бити добра смјерница за даљи рад.

Примијењене статистичке методе које поред стандардних статистичких поступака користе закон пораста вјероватноће, процјену кривих вијека трајања уз примјену статистичких расподела екстремних вриједности представљају поуздане методе које су верификоване у посљедњих пар година у научним радовима објављеним у врхунским часописима са SCI листе, а за област процјене вијека трајања електро-енергетског постројења. Те методе преузете и примјењене у овом раду су веома поуздане и модели развијени на бази њих се могу сматрати једним значајним доприносом примјене статистичке математике у ефикасности ниско-енергетских објеката (први, други, трећи, четврти Објекат).

VI РЕЗУЛТАТИ И НАУЧНИ ДОПРИНОС ИСТРАЖИВАЊА

Статистичком обрадом експерименталних података кандидат је дошао до резултата који поуздано одређују брзину функционалног старења компонената фотонапонске конверзије енергије у зависности од амбијенталних услова вршећи дуготрајне експерименте у реалним условима. Паралелно с тим кандидат је методама карактеристичним за нуклеарну физику у лабораторијским испитивањима под добро контролисаним лабораторијским условима развио метод убрзаног старења ових компоненти за фотонапонску конверзију енергије при чему су процеси старења у реалним условима и у лабораторијским условима резултирали у једнозначној корелацији. На бази тих резултата било је могуће извршити предикцију понашања полупроводничких компоненти за фотонапонску конверзију за дужи временски период. Добијени резултати су јасно приказани, правилно, логично и јасно тумачени. Кандидат је добијене резултате упоређивао са резултатима других аутора, при чему је добијено добро слагање.

Допринос овог рада се може посматрати са научног и стручног аспекта. Научни аспект рада је несумњиво у развоју оригиналног поступка за испитивање старења и могућности процјене радног вијека компоненти за фотонапонску конверзију енергије. Стручни допринос се заснива на добро конципираном експерименталном поступку и што је најважније закључак који аутор даје о економским аспектима и фотонапонској конверзији енергије полупроводничких компоненти. Овај посљедњи закључак указује на неопходност даљег развоја полупроводничких компоненти фотонапонске конверзије енергије веће ефикасности енергије пошто је овим радом недвојбено установљено да полупроводничке компоненте доступне на тржишту (силицијумске соларне ћелије) су неекономичне и могу се примјењивати

само уз субвенционисање. У том циљу треба радити на развоју нових полупроводничких легура са донорским и акцепторским нивоима енергетске зоне, на шта је кандидат указао у свом раду.

VII ЗАКЉУЧАК И ПРИЈЕДЛОГ

На основу експерименталног испитивања ефикасности материјализације фасада на четири карактеристична ниско-енергетска објекта у Београду, доказана је могућност обезбјеђења довољне количине електричне енергије за нормално и комфортно становање уз избјегавање нерационалне конверзије електричне енергије у топлотну. Дуготрајним испитивањима на експерименталним објектима сложеним аутоматизованим мјерним системом добијени су резултати, који прецизно дефинишу ефекте релевантних параметара (биоклиматских и геоклиматских). Све то утиче на укупну електричну снагу која се фотонапонским соларним панелима може добити у зависности од годишњег доба. Резултати су добијени моделовањем материјализације фасада објеката, а коначни квантитативни закључци су добијени на бази статистичког повећања димензије материјализоване фасаде са интегрисаним соларним панелима. Добијени резултати су потврдили могућност уштеде примјеном интегрисаних фотонапонских система у фасаду објекта. Имајући у виду да је фотонапонска конверзија енергије еколошки прихватљива, могло се закључити да је овај облик материјализација фасада објеката препоручљив. Сагледано је још једно питање економске исплативости оваквих система за снабдијевање електричном енергијом (допунском или у цјелости).

Одговарајући на ово питање, на основу експеримената вршених у разумном року, прибјегло се софистицираном методом контролисаног убрзавања старења фотонапонских ћелија. Лабораторијским мјерењима, под добро контролисаним условима успостављена је једнозначна повезаност између ефекта стварног старења и убрзаног старења, било је могуће процијенити економску исплативост интеграције фотонапонских система у материјализацију објекта. Овако добијена електрична енергија, тренутно је корисницима скупља око четири пута од енергије које могу да преузимају из нисконапонске дистрибутивне мреже (која је у урбаним срединама свима доступна). Наравно, то не значи да треба одбацити материјализацију фасада соларним панелима у циљу побољшања квалитета живота, како станара објекта тако и са аспекта друштвене оправданости. Напротив, добијени резултати указују да би се објекти на којима је извршена материјализација фасада фотонапонским панелима могли шире користити и то двосмјерно. Односно, када фотонапонски панели производе више снаге него што објекат троши да се тај вишак активне снаге убаци у нисконапонску мрежу. Када објекат троши већу снагу него што интегрисани систем производи, да се додатна снага преузме из нисконапонске дистрибутивне мреже. При томе, треба напоменути да би држава својим субвенцијама, или на неки други начин требала да учествује у материјализацији објеката фотонапонским системима. Данашња ситуација је тешка, низак је стандард грађана, те се не може очекивати да су власници објеката заинтересовани за инвестирање у такву материјализацију фасада. Ове спознаје треба приближити и подићи свијест о јавном добру.

Стручни и научни резултати приказани у докторској дисертацији имају могућност практичне примјене. Ту се посебно истиче метода убрзаног старења фотонапонских ћелија примјеном радиоактивног зрачења, као и метода процјене њиховог вијека трајања на основу кривих вијека трајања. Проведени методолошки приступ омогућава предикцију експлоатационог животног вијека система напајања објеката на основу, релативно, краткотрајних експерименталних истраживања. Примјена Закона вијека трајања на статистичке узорке релевантних случајних величина одређених експериментално, омогућава поуздану предикцију брзине старења и преостало вријеме експлоатације фотонапонског система за

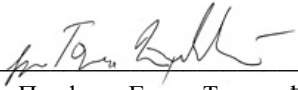
допунско напајање објеката електричном енергијом. Ако се томе дода да Закон пораста вјероватноће омогућава добијање статистичких узорака релевантних случајних величина читавог система за допунско напајање електричном енергијом вршењем експеримента на знатно умањеном узорку може се закључити да приказани поступак омогућава да се, у будућности, долази до података о ефикасности и економској исплативости оваквих система уз знатну уштеду времена и материјалних средстава.

Сам коначни резултат истраживања сагледив је у чињеници да је примјена фотонапонске конверзије енергије на допунско снабдијевање стамбених објеката комерцијално исплатива само уз политику државних субвенција. То не треба схатити негативним, него управо супротно. Овај резултат треба схватити као подстрек за наставак будућих истраживања на ову тему, у циљу побољшања ефикасности соларних ћелија у зависности од амбијенталних услова примјене и карактеристика објекта на који се примјењују. У том смислу требало би истраживати примјену других полупроводничких материјала за израду соларних ћелија и подлога за монтирање на стамбене објекте који би могли да повећају ефикасност соларних ћелија и смање трошкове њихове примјене. Могућа рјешења јесу примјена полупроводничких материјала са донорским нивоима унутар забрањене зоне и рефлектујућих површина којим је соларна ћелија причвршћена на стамбени објекат.

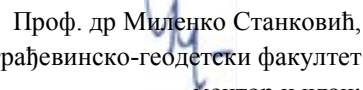
Имајући у виду цјелокупни научно-истраживачки опус кандидаткиње, садржај докторске дисертације и оцјене изнијете у овом Извештају, Комисија доноси позитивно мишљење о докторској дисертацији у цјелини и закључује да дисертација садржи значајан допринос у области архитектуре, грађевинарства и енергетске ефикасности и са задовољством предлаже Наставно-научном вијећу Архитектонско-грађевинско-геодетског факултета Универзитета у Бањој Луци да се докторска дисертација под називом **Материјализација фасада ниско-енергетских објеката**, кандидата мр Весна Трифуновић-Драгишић, прихвати, и изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Сенату Универзитета у Бањој Луци.

Датум: 10. 9. 2019. године

ПОТПИС ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ:



Проф. др Горан Ћировић
Универзитет у Новом Саду; Факултет техничких наука
предсједник комисије



Проф. др Миленко Станковић,

Универзитет у Бањој Луци; Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет
— ментор и члан;



Проф. др Љубиша Прерадовић,
Универзитет у Бањој Луци; Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет
Члан

ИЗДВОЈЕНО МИШЉЕЊЕ: Члан комисије који не жели да потпише извјештај јер се не слаже са мишљењем већине чланова комисије, дужан је да унесе у извјештај образложење, односно разлог због којих не жели да потпише извјештај.

UNIVERZITET U BANJOJ LUCI
PODACI O AUTORU ODBRANJENE DOKTORSKE DISERTACIJE

Ime i prezime autora disertacije	Vesna Trifunović-Dtagišić
Datum, mjesto i država rođenja autora	02.07.1972., Beograd, R Srbija
Naziv završenog fakulteta/Akademije autora i godina diplomiranja	Fakultet za graditeljski menadžment Univerziteta Union u Beogradu; 2005.god.
Datum odbrane master/magistarskog rada autora	17.11.2008.
Naslov master/magistarskog rada autora	„Staklene fasade u savremenoj arhitekturi“
Akadska titula koju je autor stekao odbranom master/magistarskog rada	magistar tehničkih nauka iz oblasti arhitekture
Akadska titula koju je autor stekao odbranom doktorske disertacije	doktor tehničkih nauka
Naziv fakulteta /Akademije na kome je doktorska disertacija odbranjena	Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet u Banjoj Luci, Univerzitet u Banjoj Luci
Naziv doktorske disertacije i datum odbrane	„MATERIJALIZACIJA FASADA NISKO- ENERGETSKIH OBJEKATA“
Naučna oblast disertacije prema CERIF šifrniku	
Imena mentora i članova komisije za odbranu doktorske disertacije	Prof. dr Milenko Stanković-mentor i član; Prof. dr Goran Ćirović-predsjednik; Prof. dr Ljubiša Preradović-član

U Banjoj Luci, dana 09.12.2019.



Dekan

Izjava 1

IZJAVA O AUTORSTVU

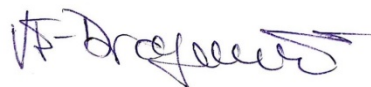
**Izjavljujem
da je doktorska disertacija**

Naslov rada „MATERIJALIZACIJA FASADA NISKO-ENERGETSKIH OBJEKATA“

Naslov rada na engleskom jeziku „MATERIALIZATION OF THE FACADE OF LOW-ENERGY BUILDING“

- ☒ rezultat sopstvenog istraživanja
- ☒ da doktorska disertacija, u cjelini ili u dijelovima, nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- ☒ da su rezultati korektno navedeni i
- ☒ da nisam kršio/la autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

Potpis doktoranta



U Banjoj Luci, dana 05.09.2019.

(Vesna Trifunović-Dragišić)

Izjava 2

Izjava kojom se ovlašćuje Univerzitet u Banjoj Luci da doktorsku disertaciju učini javno dostupnom

Ovlašćujem Univerzitet u Banjoj Luci da moju doktorsku disertaciju pod naslovom „MATERIJALIZACIJA FASADA NISKO-ENERGETSKIH OBJEKATA“ koja je moje autorsko delo, učini javno dostupnom.

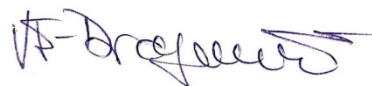
Doktorsku disertaciju sa svim priložima predao/la sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u d i g i t a l n i r e p o z i t o r i j u m Univerziteta u Banjoj Luci mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (*Creative Commons*) za koju sam se odlučio/la.

- ☐ Autorstvo
- ☒ Autorstvo – nekomercijalno
- ☐ Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
- ☐ Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima
- ☐ Autorstvo – bez prerade
- ☐ Autorstvo – deliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poledini lista).

Potpis doktoranta



(Vesna Trifunović-Dragišić)

U Banjoj Luci, dana 05.09.2019.

TIPOVI LICENCI KREATIVNE ZAJEDNICE

Autorstvo (CC BY)

Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora, na način određen od autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.

Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)

Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela i prerade, ako se navede ime autora, na način određen od autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.

Autorstvo – bez prerada (CC BY-ND)

Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, bez promjena, preoblikovanja ili upotrebe djela u svom djelu, ako se navede ime autora, na način određen od autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja djela.

Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)

Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dijela, i prerade, ako se navede ime autora, na način određen od autora ili davaoca licence, i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela i prerada.

Autorstvo – bez prerada (CC BY-ND)

Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dijela, bez promjena, preoblikovanja ili upotrebe djela u svom djelu, ako se navede ime autora, na način određen od autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.

Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dijela, i prerade, ako se navede ime autora, na način određen od autora ili davaoca licence, i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.

Napomena: Ovaj tekst nije sastavni dio izjave autora.

Više informacija na linku: <http://creativecommons.org.rs/>

Izjava 3

Izjava o identičnosti štampane i elektronske verzije doktorske disertacije

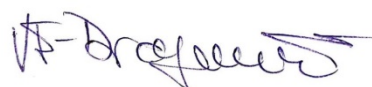
Ime i prezime autora Vesna Z. Trifunović-Dragišić

Naslov rada **„MATERIJALIZACIJA FASADA NISKO-
ENERGETSKIH OBJEKATA“**

Mentor dr Milenko Stanković, redovni profesor
Univerzitet u Banjoj Luci
Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet

Izjavljujem da je štampana verzija moje doktorske disertacije identična elektronskoj verziji koju sam predao/la za digitalni repozitorijum Univerziteta u Banjoj Luci.

Potpis doktoranta



(Vesna Trifunović-Dragišić)

U Banjoj Luci, dana 05.09.2019.