

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br. 3929

**TEHNIČKO EKONOMSKA ANALIZA
FOTONAPONSKIH SUSTAVA NA
ZGRADAMA**

Denis Koren

Zagreb, lipanj 2015.

Velika zahvala prof. Šimiću na vodstvu kroz Projekt i Završni rad.

Zagreb, 9. ožujka 2015.

ZAVRŠNI ZADATAK br. 3929

Pristupnik: **Denis Koren (0036469589)**
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Modul: Elektroenergetika

Zadatak: **Tehničko ekonomska analiza fotonaponskih sustava na zgradama**

Opis zadatka:

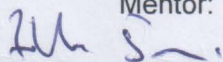
Sve značajnije i ubrzano korištenje fotonaponskih rješenja za proizvodnju električne energije može se održati samo uz daljnje smanjenje još uvijek visoke cijene tako proizvedene električne energije. Za specifične primjene optimiranje može favorizirati maksimiziranje proizvedene električne energije. Ova pitanja nemaju jedinstven niti jednostavan odgovor. Veliki broj tehnologija i specifičnosti različitih primjena predstavljaju potencijal za veliki broj mogućih rješenja. Jedna posebno interesantna i sve važnija primjena fotonaponskih instalacija je na zgradama.

Zadatak je analizirati utjecaj različitih tehnologija i konfiguracija fotonaponskih rješenja na zgradama. Potrebno je identificirati kriterije i pristup odvojenom određivanju optimalne konfiguracija za dva cilja: najprije za ekonomičnost, a potom za maksimalnu proizvodnju električne energije. Pristup treba demonstrirati konkretnim primjerima.

Zadatak uručen pristupniku: 13. ožujka 2015.

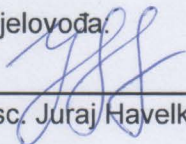
Rok za predaju rada: 12. lipnja 2015.

Mentor:



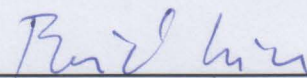
Izv. prof. dr. sc. Zdenko Šimić

Djelovođa:



Doc. dr. sc. Juraj Havelka

Predsjednik odbora za
završni rad modula:



Prof. dr. sc. Ivica Pavić

Sadržaj

1.	Uvod	4
2.	Općenito o radu.....	5
2.1.	Lokacija Muzeja suvremene umjetnosti.....	5
2.2.	Sunčevo zračenje na lokaciji Muzeja.....	6
2.3.	Odabir opreme	7
3.	Analiza fotonaponskih sustava na krovu Muzeja suvremene umjetnosti	10
3.1.	Određivanje dostupnih površina.....	10
3.2.	Analize sustava	11
3.2.1.	1. Sustav	13
3.2.2.	2. Sustav	16
3.2.3.	3. Sustav	18
3.2.4.	4. Sustav	20
3.2.5.	5. Sustav	21
3.3.	Osvrt na dobivene rezultate.....	23
4.	SPVH – Solar Powered Vernacular House	26
4.1.	Općenito o SPVH	26
4.2.	Definiranje potrebne opreme za pojedini sustav.....	28
4.3.	Analize sustava	31
4.3.1.	Krov	31
4.3.2.	Zid jug	32
4.3.3.	Zid istok	32
4.3.4.	Zid zapad	33
4.4.	Osvrt na rezultate analiza.....	33
5.	Zaključak.....	35
6.	Literatura, izvori i reference.....	36
7.	Sažetak	37
8.	Ključne riječi	38
9.	Dodatak	39

Popis tablica

Tablica 1. Prikaz insolacije i ostalih parametara po mjesecima u godini (PVGIS) [3].....	6
Tablica 2. Karakteristike odabranih modula	8
Tablica 3. Prikaz rezultata simulacija 3 tehnologije prvog sustava.....	14
Tablica 4. . Prikaz rezultata simulacije prvog sustava uz nagib 10°	15
Tablica 5. Prikaz rezultata simulacije prvog Sustava uz nagib 34°	16
Tablica 6. Prikaz rezultata simulacija 3 tehnologije drugog sustava	17
Tablica 7. Prikaz rezultata simulacija drugog sustava uz nagibe 10° i 34°	18
Tablica 8. Prikaz rezultata simulacija 3 tehnologije trećeg sustava	19
Tablica 9. Prikaz rezultata simulacija trećeg sustava uz nagibe 10° i 34°.....	19
Tablica 10. Prikaz rezultata simulacija 3 tehnologije četvrtog sustava	20
Tablica 11. Prikaz rezultata simulacija četvrtog sustava uz nagibe 10° i 34°	21
Tablica 12. Prikaz rezultata simulacija 3 tehnologije petog sustava	22
Tablica 13. Prikaz rezultata simulacija petog sustava uz nagibe 10° i 34°	22
Tablica 14. Sumarni rezultati svih petero sustava zajedno.....	25
Tablica 15. Odabrana oprema s cijenama za monokristalnu varijantu krova	29
Tablica 16. Odabrana oprema s cijenama za polikristalnu varijantu krova	29
Tablica 17. Odabrana oprema s cijenama za krov varijante tanki film.....	30
Tablica 18. Prikaz sve 3 tehnologije na krovu.....	31
Tablica 19. Prikaz sve 3 tehnologije na južnom zidu	32
Tablica 20. Prikaz sve 3 tehnologije na istočnom zidu	32
Tablica 21. Prikaz sve 3 tehnologije na zapadnom zidu	33
Tablica 22. Sumarna tablica za sve površine i sve tehnologije na SPVH	34

Popis slika

<i>Slika 1. Muzej suvremene umjetnosti [4]</i>	5
<i>Slika 2. Karakteristike invertera, PVSyst</i>	9
<i>Slika 3. Tlocrt krova Muzeja suvremene umjetnosti</i>	11
<i>Slika 4. Izgled prvog sustava uz nagib 0°</i>	14
<i>Slika 5. Izgled prvog sustava uz nagib 10°</i>	15
<i>Slika 6. Izgled prvog sustava uz nagib 0°</i>	16
<i>Slika 7. Izgled drugog sustava uz nagib 0°</i>	17
<i>Slika 8. Izgled trećeg sustava uz nagib 0°</i>	18
<i>Slika 9. Izgled četvrtog sustava uz nagib 0°</i>	20
<i>Slika 10. Izgled petog sustava uz nagib 0°</i>	21
<i>Slika 11. Prikaz gubitaka prvog sustava pod nagibom 34°</i>	24
<i>Slika 12. Satelitska snimka Muzeja [4]</i>	26
<i>Slika 13. SPVH [1]</i>	27
<i>Slika 14. SPVH – pogled s južne strane [1]</i>	28

1. Uvod

Ovaj Završni rad nastavak je rada koji se odvijao na predmetu Projekt iz zimskog semestra akademske godine 2014./15. Cilj cjelokupnog istraživanja je ispitati kako različite fotonaponske tehnologije u različitim uvjetima utječu na energetske i ekonomske karakteristike sustava. Istraživanje je provedeno u dva dijela, jedan dio usmjeren je na velike fotonaponske sustave, dok drugi dio obuhvaća manje sustave, pogodne za instalaciju na obiteljske kuće. Na tim primjerima moći će se vidjeti specifični utjecaji.

Cijelo istraživanje odvija se na krovu Muzeja suvremene umjetnosti u Zagrebu prema inicijativi američko – njemačkog umjetnika Davida Smithsona [1]. On je osmislio koncept SPVH, *Solar Powered Vernacular House*, koji se može prevesti na hrvatski jezik kao Pučka kuća na solarni pogon. Riječ je o posebnom paviljonu Muzeja koji bi istovremeno bio umjetnička instalacija smještena na krovu. Dosadašnji rad na projektu SPVH financiran je iz gradskog proračuna, a sam će koncept detaljnije biti predstavljen i analiziran u nastavku ovog rada.

S obzirom na to, prilike kod velikih fotonaponskih sustava istraživat će se projektiranjem i simuliranjem takvih sustava na dostupnim površinama krova Muzeja, dok će se manji sustavi analizirati na primjeru SPVH. Ispitivat će se utjecaj različitih fotonaponskih tehnologija, u različitim položajima i nagibima na proizvodnju električne energije i u konačnici njezinu cijenu.

U oba dijela rada prvotno su određene dostupne površine za instalaciju sustava nakon čega je slijedila njihova analiza. Nakon provedene analize, dobiveni su rezultati koji su prokomentirani i objašnjeni.

2. Općenito o radu

Bez obzira na to što se u radu analiziraju 2 različita tipa sustava, oni imaju svoje zajedničke dijelove koji će biti analizirani u ovom poglavlju. Prije svega, oni se nalaze na istoj lokaciji za koju je vrlo bitno da se točno odredi zbog prilika koje se na njoj javljaju, a bitne su za funkcioniranje fotonaponskih sustava. Nakon toga slijedi odabir fotonaponskih modula, invertera i ostale opreme koja će se koristiti u oba sustava.

2.1. Lokacija Muzeja suvremene umjetnosti

Muzej suvremene umjetnosti (Slika 1.) smješten je u Novom Zagrebu. Krov Muzeja je horizontalan s mnogo površine pogodne za postavljanje fotonaponskih modula. Na slici je također označeno mjesto predviđeno za instalaciju spomenute tradicionalne pučke kuće.



Slika 1. Muzej suvremene umjetnosti [4]

2.2. Sunčevo zračenje na lokaciji Muzeja

Kod projektiranja fotonaponskih sustava vrlo je važno odrediti točnu lokaciju na kojoj će sustav biti postavljen kako bi se na osnovu toga došlo do podataka o sunčevom zračenju na tom mjestu. Muzej suvremene umjetnosti nalazi se na koordinatama od 45.8° sjeverne geografske širine i 16° istočne geografske dužine. Te koordinate unesu se u PVGIS [3] – online alat koji na temelju unesenih koordinata ispiše podatke o toj lokaciji prikazane u tablici 1. Računalni program koji će se koristiti za projektiranje fotonaponskih sustava je PVSyst [2]. Jednostavan je za korištenje, a velika mu je prednost što sadrži veliku bazu fotonaponskih modula i invertera pa njihove parametre nije potrebno ručno unositi što uvelike olakšava posao.

U PVSyst unosi se ozračenost na ravnu plohu za prosječni dan u mjesecu (H_h) i prosječnu temperaturu zraka po mjesecima (T_{24h}). Ostali podaci koje PVGIS prikazuje su optimalni kut po mjesecima za postavljanje panela (I_{opt}) pa prema tom kutu prikazuje optimalnu ozračenost (H_{opt}). Također prikazuje ozračenost pri kutu od 90° ($H(90)$), itd. Ozračenost je izražena u vatsatima po metru kvadratnom u danu.

Tablica 1. Prikaz insolacije i ostalih parametara po mjesecima u godini (PVGIS) [3]

Month	$H_h(Wh/m^2/dan)$	$H_{opt}(Wh/m^2/dan)$	$H(90)(Wh/m^2/dan)$	$I_{opt}(^\circ)$	$T_{24h}(^\circ C)$
Jan	1090	1690	1690	62	0.4
Feb	1950	2840	2630	57	1.7
Mar	3380	4280	3340	45	6.6
Apr	4660	5210	3260	1	11.9
May	5680	5740	290	18	16.8
Jun	6230	6030	2740	13	20.4
Jul	6300	6260	2950	16	22.9
Aug	5520	6000	3390	28	22.4
Sep	3830	4690	3400	41	16.7
Oct	2490	3460	3020	53	12.0
Nov	1250	1860	1780	59	6.9
Dec	854	1330	1340	63	1.6
Year	3610	4120	2700	34	11.7

Ozračenost je, očekivano, najveća u ljetnim mjesecima, a najmanja u zimskim. Optimalni kut za postavljanje modula se također mijenja sezonski. Fotonaponske ćelije najviše energije proizvode kad sunčeve zrake upadaju okomito na njih. Stoga, ljeti kad je Sunce visoko na nebu, optimalni kut je manji (13° u lipnju) dok je zimi Sunce nisko na nebu pa je kut veći (63° u prosincu). Potrebno je napomenuti da je često nemoguće mijenjati kut nagiba tokom godine pa se definira onaj optimalan na godišnjoj razini. Za ovu lokaciju on iznosi 34°.

2.3. Odabir opreme

Prvi korak je, očekivano, odabir fotonaponskih modula s obzirom na postavljene zahtjeve. Jedan od ciljeva ovog rada je ispitati razlike između 3 tehnologije izrade fotonaponskih ćelija koje u najvećoj mjeri nastaju temeljem razlika u njihovoj efikasnosti. Monokristalna tehnologija izrade fotonaponskih ćelija ima najveću efikasnost (trenutno max. oko 22%), polikristalna nešto manju (14-16%) dok tanki film najmanju (8-10%). Osim efikasnosti, bitni parametri pojedinih modula su njihova vršna snaga, temperaturni koeficijent, struja kratkog spoja, napon praznog hoda, itd. Oni su svi sadržani u bazama fotonaponskih modula u PVSyst-u. Glavni kriterij odabira bio je da je module moguće kupiti u Hrvatskoj iz razloga da se vidi situacija na lokalnom tržištu. Naime, u dosadašnjim analizama korištene su aproksimativne cijene po vatu instalirane snage sustava. Moglo bi se reći da su to bile grube, tj. okvirne cijene. U ovom radu cijene sustava bit će definirane na temelju konkretnih ponuda dobivenih u specijaliziranim trgovinama solarnom opremom. Budući da se formiranje konačne cijene razlikuje kod velikih i malih fotonaponskih sustava, točan način bit će objašnjen u tim poglavljima.

Sljedeći kriterij odabira bio je da su moduli poznatih proizvođača i da svaki od njih ima dugogodišnje jamstvo na izlaznu snagu. Proizvođač time jamči da u tom periodu njegova vršna snaga neće pasti ispod 80% snage koju je imao u trenutku kupnje. Tablica 2. prikazuje odabrane module za pojedinu varijantu, njihove vršne snage, efikasnosti i cijenu u Hrvatskoj.

Tablica 2. Karakteristike odabranih modula

VARIJANTA	PROIZVOĐAČ	MODEL	VRŠNA SNAGA [W]	DIMENZIJE [mm/kg]	EFIKASNOST [%]	CIJENA (kn, bez PDV-a)
MONOKRISTALNA	Yingli Solar	YL280C- 30b	280	1640x990x40/ 18.5	17.2	1584
POLIKRISTALNA	Solvis	SV 60 - 255	255	1650x992x40/ 18.7	15.67	1150
TANKI FILM	Solteature	Linion 75	75	1258x658x30/ 14.6	9.82	560

Potrebno je napomenuti da je na tržištu najveća zastupljenost polikristalnih modula pa je kod njih moguć širi izbor proizvođača. Stoga je u toj varijanti odabrana hrvatska tvrtka, Solvis. Monokristalne varijante fotonaponskih modula su nešto slabije zastupljene i cijena im je veća. Što se tiče modula varijante tanki film, oni su daleko najmanje zastupljeni na hrvatskom tržištu što za posljedicu donosi dosta višu cijenu te varijante od očekivane. Na početku je postojao uvjet da zbog smanjenja količine proračuna dimenzije svih vrsta modula budu jednake, ali zbog situacije s varijantom tanki film to nije bilo moguće pa se dimenzije tih modula razlikuju od dimenzija ostalih dviju tehnologija. To je za posljedicu stvorilo određene probleme koji će biti kasnije analizirani.

Druga stavka potrebna kod fotonaponskih sustava spojenih na mrežu su mrežni pretvarači – inverteri. To su uređaji koji istosmjerni napon na izlazu iz modula pretvaraju u izmjenični, sinkroniziran na mrežu na koju su spojeni. U ovom slučaju to je napon 230V, frekvencije 50Hz. Nazivna snaga im se kreće sve do nekoliko desetaka kW pa se s obzirom na snagu izvode kao jednofazni ili trofazni. Oni također imaju svoju efikasnost koja je uglavnom dosta veća od 90%.

Odabir pretvarača (invertera) ovisi o instaliranoj snazi pojedinog sustava i rasponu napona modula pa će tako za svaki sustav biti odabran(i) inverter(i) koji odgovara(ju) tim zahtjevima. S obzirom na velike razlike u instaliranim snagama pojedinih sustava, odabrano je više vrsta invertera. Svi su poznatog svjetskog proizvođača SMA, vrlo visoke efikasnosti. Točan odabir invertera za pojedini sustav nije toliko važan jer su svi odabrani približno jednake učinkovitosti. Također su svi dostupni u Hrvatskoj pa je

poznata njihova cijena. Na slici 2. nalazi se prikaz karakteristika jednog od korištenih invertera, **SMA Sunny Tripower 20000 TLHE**, učinkovitosti od čak 99%! To su podaci iz baze PVSyst-a.

The screenshot shows the 'Grid inverter definition' window with the following parameters:

Parameter	Value	Unit
Model	Sunny Tripower 20000 TLHE	
Manufacturer	SMA	
File name	SMA_Tripower_20000TL_HE.DND	
Data source	Manufacturer 2010	
Input side (DC PV field)		
Minimum MPP Voltage	580	V
Min. Voltage for PNom	580	V
Nominal MPP Voltage	580	V
Maximum MPP Voltage	800	V
Absolute max. PV Voltage	1000	V
Power Threshold	100.0	W
Contractual specifications, without real physical meaning ? Required		
Nominal PV Power	20.3	kW
Maximum PV Power	20.3	kW
Maximum PV Current	36.0	A
Output side (AC grid)		
Type	<input type="radio"/> Monophased <input checked="" type="radio"/> Triphased <input type="radio"/> Biphased	
Frequency	<input checked="" type="checkbox"/> 50 Hz <input checked="" type="checkbox"/> 60 Hz	
Grid Voltage	400	V
Nominal AC Power	20.0	kW
Maximum AC Power	20.0	kW
Nominal AC current	29.0	A
Maximum AC current	29.0	A
Efficiency		
Maximum efficiency	99.0 %	
EURO efficiency	98.6 %	?
<input type="checkbox"/> Efficiency defined for 3 voltages		

Slika 2. Karakteristike invertera, PVSyst

Što se ostale opreme tiče (nosača, kabela, spojne i zaštitne opreme), odabir se uvelike razlikuje kod velikih i manjih sustava pa će to biti posebno analizirano.

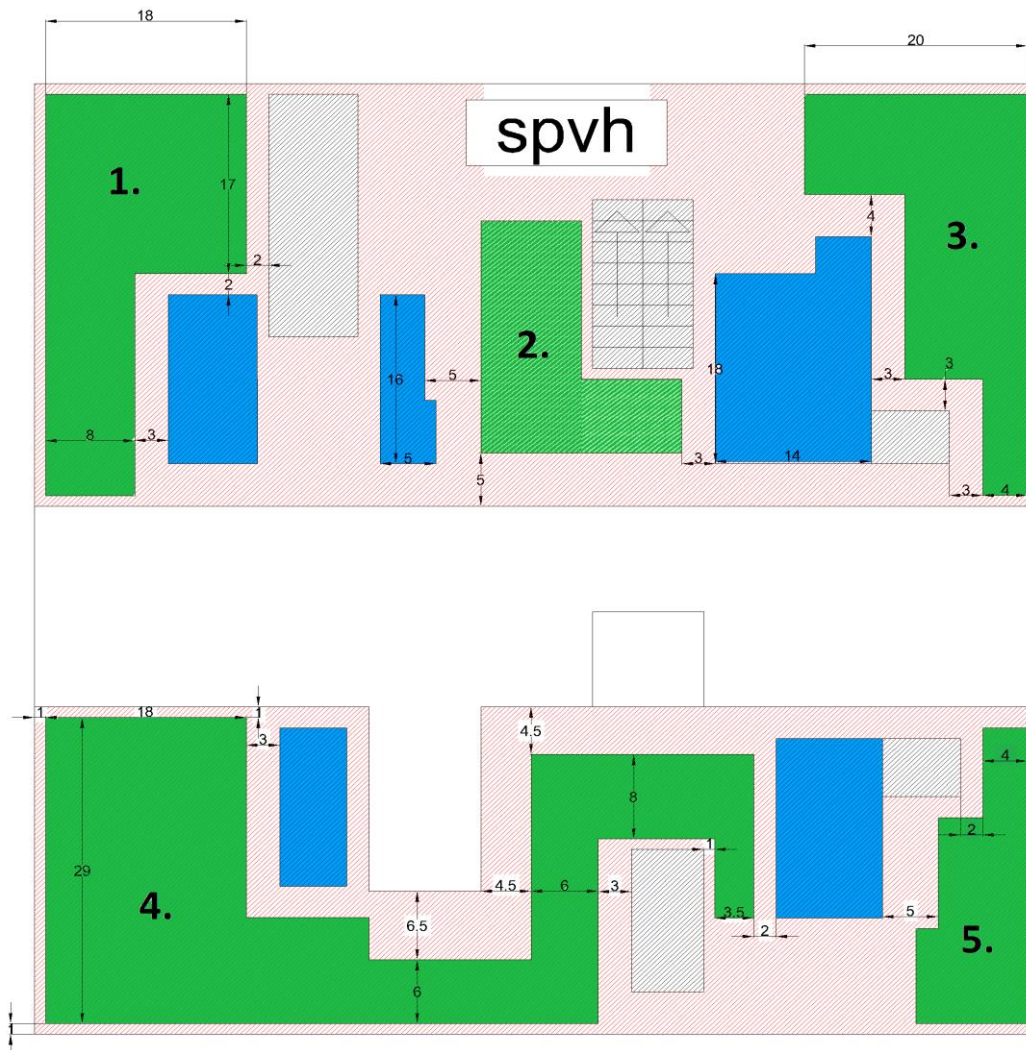
U ekonomske proračune uključen je godišnji trošak održavanja i osiguranja sustava. On se izražava relativno prema troškovima instalacije ili prihoda od proizvodnje električne energije. Budući da u analiziranim sustavima na Muzeju neće biti prodaje električne energije nego će sva energija biti odmah potrošena, taj trošak će godišnje iznositi oko 1% ukupne cijene sustava. 1% je okvirno zadano jer je taj trošak određen individualno za svaki sustav.

3. Analiza fotonaponskih sustava na krovu Muzeja suvremene umjetnosti

U ovom poglavlju analizirat će se prilike na velikim fotonaponskim sustavima na krovu Muzeja suvremene umjetnosti. Pod tim pojmom podrazumijevaju se sustavi instaliranih snaga od po nekoliko desetaka kilovata pa na više. Prvo će se odrediti dostupne površine krova i u skladu s tim broj i veličina sustava. Sustavi će se projektirati s tri različite tehnologije proizvodnje fotonaponskih ćelija te pod različitim kutovima nagiba. Rezultati dobiveni simulacijama bit će pregledno prikazani u tablicama, analizirani i uspoređeni. Na kraju će se prikazati rezultati za cijeli krov, svih sustava zajedno.

3.1. Određivanje dostupnih površina

Budući da od strane Muzeja postoje različiti zahtjevi te budući planovi za krov, zajedno s osobljem dogovorene su površine koje bi bile dostupne za instalaciju fotonaponskih sustava. Slika 3. prikazuje tlocrt cijelog krova Muzeja suvremene umjetnosti. Zelenom bojom označene su površine dostupne za instalaciju fotonaponskog sustava. Kao što je i vidljivo, one nisu spojene u jednu cjelinu nego su „razbacane“. Plavom bojom prikazani su ventilacijski kavezi, vidljivi na slici 1. Oni se izdižu u vis pa uzrokuju zasjenjenje koje bi stvaralo gubitke na fotonaponskim sustavima. Iz tog, a i iz razloga razlomljenosti cjelokupnog sustava, dostupne površine podijeljene su u 5 dijelova, označenih brojevima, te će se svaki dio razmatrati kao zaseban sustav. Oznaka SPVH prikazuje mjesto predviđeno za umjetnički paviljon koji će biti analiziran u drugom dijelu rada. Bijelom bojom označene su površine nedostupne za instalaciju fotonaponskih modula – otvori, stepenice i sl. Ostatak krova, po želji osoblja Muzeja, mora ostati slobodan, a to osigurava i poželjan slobodan pristup fotonaponskim sustavima zbog održavanja i sl.



Slika 3. Tlocrt krova Muzeja suvremene umjetnosti

3.2. Analize sustava

Kao što je ranije navedeno, razmatrat će se 5 neovisnih sustava umjesto jednog velikog na razini cijelog krova. Budući da se radi o velikim površinama i objektima, to značajno olakšava proračune gubitaka zbog zasjenjenja, a i rezultati će na taj način biti precizniji. Najprije će se razmatrati kut nagiba panela od 0° , tj. kad su oni postavljeni horizontalno na krov. Zatim će se pod tim nagibom usporediti 3 različite

tehnologije izrade fotonaponskih ćelija. Nakon toga će se proračunavati sustavi pod nagibima panela od 10° odnosno 34° . Kut od 34° je odabran iz razloga što je on, prema podacima iz PVGIS-a, optimalan fiksni godišnji kut za lokaciju Muzeja. Ako bi se simulirale sve moguće kombinacije nagiba i tehnologija na svim površinama, ukupno bi bilo 45 različitih sustava. To bi unijelo preveliku količinu podataka u ovaj rad te bi on postao nepregledan. Stoga, sustavi s nagibima 10° i 34° razmatrat će se samo za jednu tehnologiju, onu koja se pokaže optimalnom u ranijim simulacijama. Odnosi među različitim tehnologijama će za pojedinu površinu biti vidljivi u slučaju horizontalnih panela pa se time ništa neće izgubiti.

Cijene sustava formirane su na način da je broj instaliranih modula i invertera pomnožen s jediničnom cijenom. Ovdje se mora napomenuti kako je cijena dobivena na ovaj način nešto veća od realne jer se na toliku količinu opreme ostvaruje popust. Za točnu cijenu bilo bi potrebno izraditi konkretne ponude od strane prodavatelja opreme, što za ovoliki projekt nije moguće bez naknade. Kao zasebne stavke uzeti su nosači i ostalo (kabeli, spojna i zaštitna oprema te trošak montaže). Za njih je određena cijena od po 1 kunu po vatu instalirane snage, koja se može primijeniti za veće sustave, kao što su ovi [6]. Potrebno je spomenuti kako se na cijenu sustava dodaje godišnji trošak održavanja koji je objašnjen u početnim poglavljima rada.

Što se tiče financiranja sustava, trenutno nije poznato na koji način bi to bilo izvedeno pa su stoga krajnje cijene električne energije dobivene sustavima definirane za 2 slučaja: jednokratno financiranje te kredit uz kamatnu stopu od 5%, na razdoblje od 25 godina, u kojem se i vrši simulacija za oba slučaja.

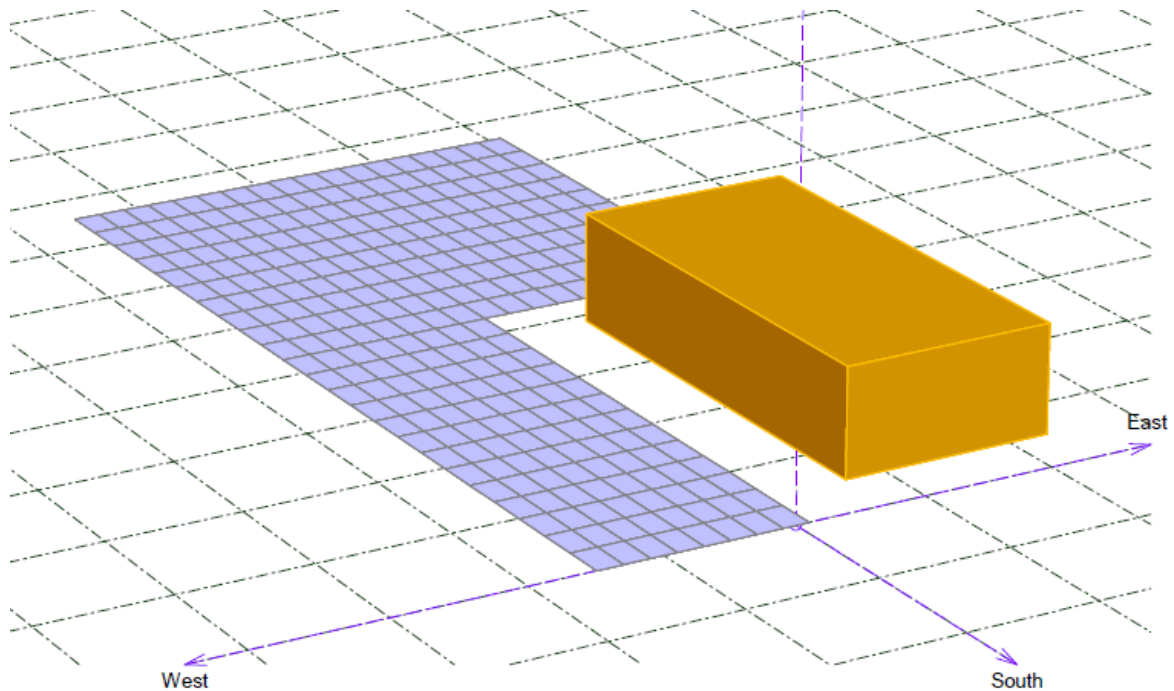
Nadalje, za svaki sustav odredit će se gubici zbog zasjenjenja, nastali kao posljedica postojanja metalnih ventilacijskih kaveza koji stvaraju sjenu. Gubici se određuju na način da se u PVSyst-u modelira sustav te prepreke koje uzrokuju gubitke. Oni se mijenjaju sezonski zbog različitih visina Sunca na nebu pa će se stoga u radu spomenuti dvije brojčane vrijednosti: gubici zimi (21.12.) te gubici ljeti (21.6.) kako bi se vidjela njihova razlika. PVSyst uzima u obzir gubitke tijekom cijele godine te ih sve uključuje u proračune.

Kod sustava gdje su moduli instalirani pod kutem (10° i 34°), oni moraju međusobno biti odmaknuti iz razloga da se eliminiraju gubici zbog zasjenjenja između njih samih. Modelirajući različite razmake modula u PVSystu, dobiveni su oni najmanji kod kojih ne dolazi do gubitaka. Na taj je način dostupna površina maksimalno iskorištena, uz nepostojanje gubitaka zbog zasjenjenja. Kod nagiba od 10° minimalan razmak među modulima iznosi **2.5 m** dok je kod 34° on **4 m**. Na taj način iskorištenje pojedine površine krova iznosi od 62% do 70% za nagib od 10° odnosno 40-ak % za 34° . Iskorištenje nije isto kod svih površina zbog različitih dimenzija i ostalih ograničenja. Potrebno je napomenuti da se taj razmak odnosi na udaljenost onih krajeva modula koji su položeni na neku površinu. Ta udaljenost prikazana je na slici 6. u sklopu analize sustava nagiba 34° . Širina praznog prostora među modulima iznosi **0.88 m** za nagib od 10° , dok je u slučaju kuta od 34° ta širina **2.63 m**.

Kako bi se postigla preglednost, u radu neće biti prikazani svi podaci dobiveni simulacijama u PVSyst-u jer se izvještaj simulacije samo jednog od sustava proteže na 5 stranica. Tablično će se prikazati osnovni podaci potrebni za analiziranje pojedinog sustava dok će u dodatku na kraju rada biti prikazan primjer cijelog izvještaja za jedan analiziran sustav.

3.2.1. 1. Sustav

Dio površine krova označen brojem 1. na slici 3. predstavlja 1. sustav. Površina mu iznosi 474 m^2 . S obzirom na dimenzije modula, kod horizontalne varijante na tu površinu moguće je instalirati 286 monokristalnih odnosno polikristalnih te 552 modula tehnologije tankog filma. Dimenzije monokristalnih i polikristalnih modula su identične, stoga je njihov broj jednak. Na tlocrtu Muzeja može se vidjeti da je s istočne strane sustava smješten ventilacijski kavez čije su dimenzije 8 x 17 metara i visine 4 metra. Sustav i kavez modelirani su u PVSystu i prikazani na slici 4.



Slika 4. Izgled prvog sustava uz nagib 0°

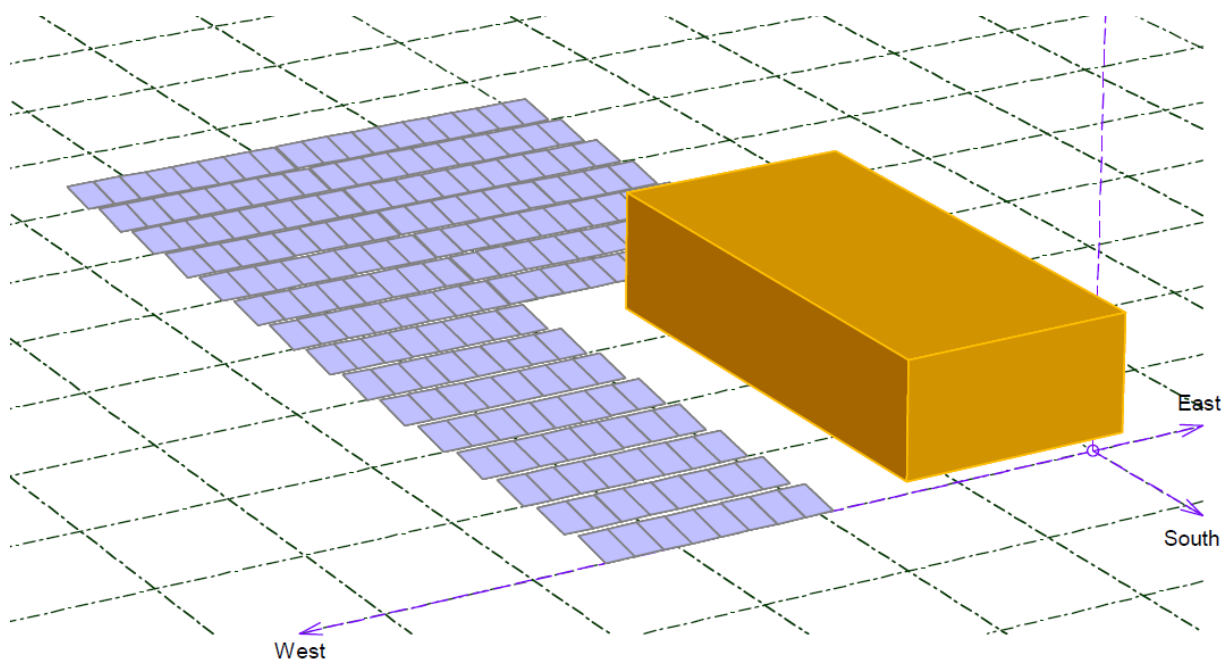
Kavez stvara gubitke na sustavu koji su najviše izraženi u prvom dijelu dana, kad je Sunce na istoku. Oni iznose 12.6 % zimi te 2.1 % ljeti. Nakon provedenih simulacija za sve 3 tehnologije, rezultati su prikazani u tablici 3. Detaljniji graf s gubicima zbog zasjenjenja, popis odabrane opreme te ostali proračuni za ovaj sustav mogu se vidjeti u izvještaju u dodatku na kraju rada.

Tablica 3. Prikaz rezultata simulacija 3 tehnologije prvog sustava

1. SUSTAV 0°	TEHNOLOGIJA	INSTALIRANA SNAGA (kWp)	UKUPNA CIJENA SUSTAVA (kn, s PDV-om)	PROIZVEDENA ENERGIJA U GODINI DANA (MWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kn/kWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kredit 5% na 25 god.)
	MONOKRISTALNI SILICIJ	80.1	866 000	80.3	0.53	0.86
	POLIKRISTALNI SILICIJ	72.9	668 000	75.4	0.45	0.72
	TANKI FILM	41.4	540 000	46.6	0.55	0.91

Kod sustava s modulima pod nagibom koristit će se polikristalna varijanta jer se ona u prethodnom primjeru pokazala ekonomski optimalnom. Modeliranje zasjenjenja će se također prilagoditi nagibima jer se gubici nešto razlikuju u odnosu na horizontalnu varijantu (Slika 5.).

Kod instalacije modula pod kutem od 10° , uz njihov obavezan ranije naveden razmak dobije se da je na ovu površinu moguće instalirati 190 modula, što je iskoristivost od 66.4%. Rezultati simulacije prikazani su u tablici 4.

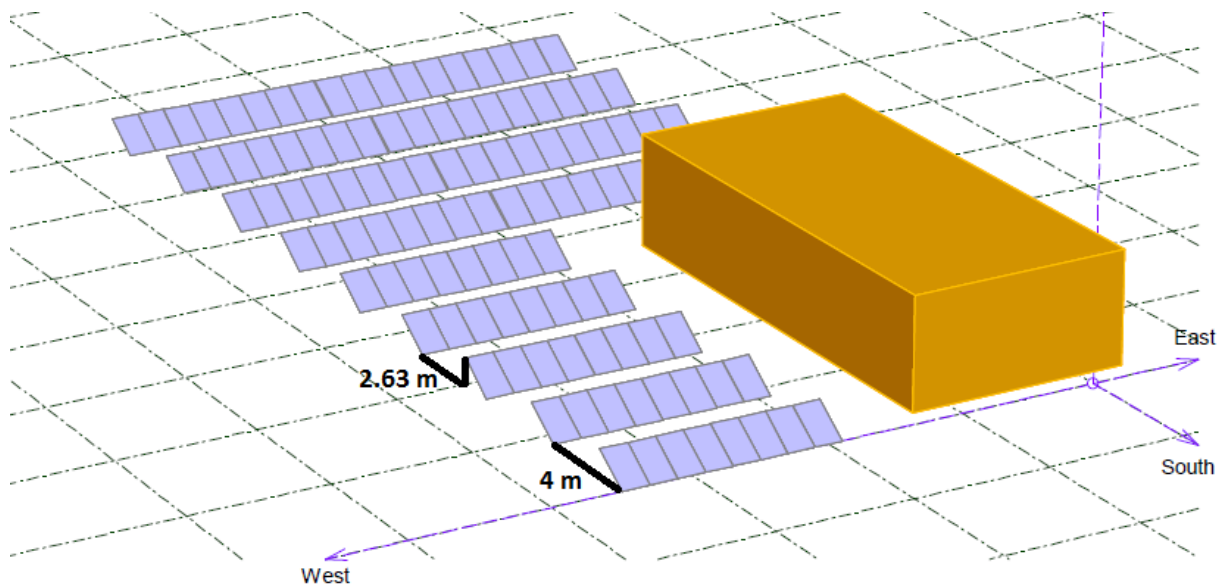


Slika 5. Izgled prvog sustava uz nagib 10°

Tablica 4. Prikaz rezultata simulacije prvog sustava uz nagib 10°

1. SUSTAV 10° POLIKRISTALNA	INSTALIRANA SNAGA	UKUPNA CIJENA SUSTAVA (kn, s PDV- om)	PROIZVEDENA ENERGIJA U GODINU DANA (MWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kn/kWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kredit 5% na 25 god)
	48.2	442 000	52.7	0.43	0.69

Za slučaj nagiba od 34° uz uvjet eliminacije međusobnog zasjenjenja, na ovoj površini moguće je instalirati 112 polikristalnih modula (39.2% u odnosu na horizontalnu površinu). Tablica 5. prikazuje rezultate simulacije tog sustava.



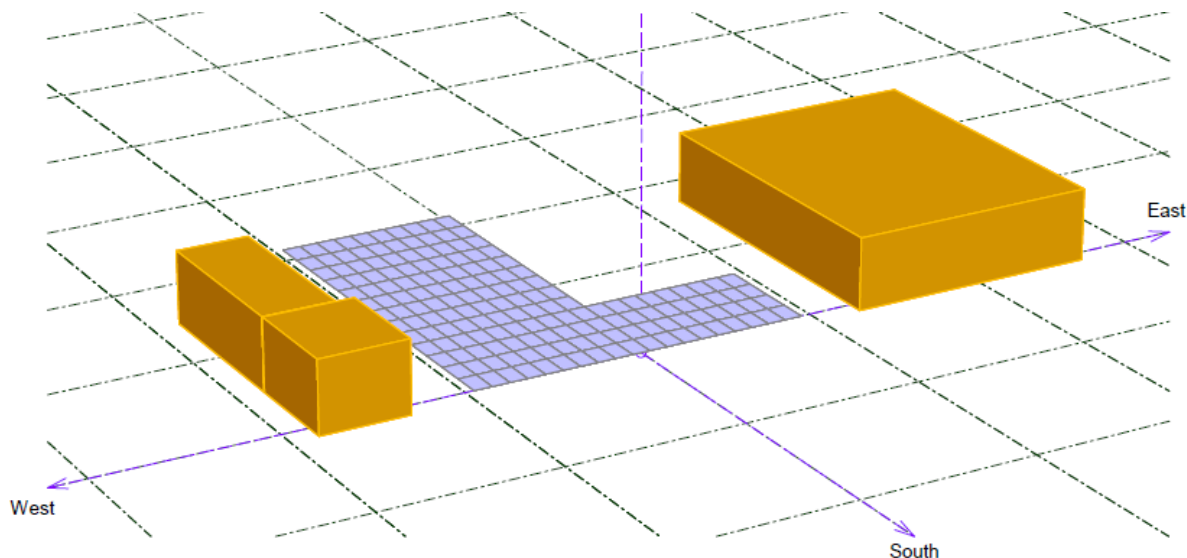
Slika 6. Izgled prvog sustava uz nagib 0°

Tablica 5. Prikaz rezultata simulacije prvog sustava uz nagib 34°

1. SUSTAV 34° POLIKRISTALNA	INSTALIRANA SNAGA	UKUPNA CIJENA SUSTAVA (kn, s PDV- om)	PROIZVEDENA ENERGIJA U GODINU DANA (MWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kn/kWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kredit 5% na 25 god)
	28.1	265 000	31.9	0.40	0.65

3.2.2. 2. Sustav

Drugi sustav, na tlocrtu označen brojem 2, površine je 283 m². Na njegovu površinu, kod horizontalne varijante, moguće je instalirati 168 monokristalnih te polikristalnih odnosno 319 modula varijante tanki film. Objekti koji stvaraju zasjenjenje na ovom sustavu nalaze se s istočne i zapadne strane, prikazano na slici 7.



Slika 7. Izgled drugog sustava uz nagib 0°

Budući da su objekti dovoljno udaljeni od sustava, ne stvaraju značajnije gubitke. Oni iznose 3.9% u prosincu, odnosno 3.5% u lipnju. Rezultati simulacije ovog sustava prikazani su u tablici 6.

Tablica 6. Prikaz rezultata simulacija 3 tehnologije drugog sustava

2. SUSTAV 0°	TEHNOLOGIJA	INSTALIRANA SNAGA (kWp)	UKUPNA CIJENA SUSTAVA (kn, s PDV-om)	PROIZVEDENA ENERGIJA U GODINI DANA (MWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kn/kWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kredit 5% na 25 god)
	MONOKRISTALNI SILICIJ	47	500 000	47.7	0.52	0.84
	POLIKRISTALNI SILICIJ	42.8	398 000	43.7	0.46	0.74
	TANKI FILM	23.9	318 000	26.7	0.55	0.92

U tablici 7. prikazani su rezultati simulacija sustava pod nagibom. Iskoristivost površine u ovom slučaju kod nagiba od 10° je 69.6% dok kod 34° ona iznosi 40.5%. U ovoj, a i u svim ostalim površinama, zasjenjenja kod sustava pod nagibom

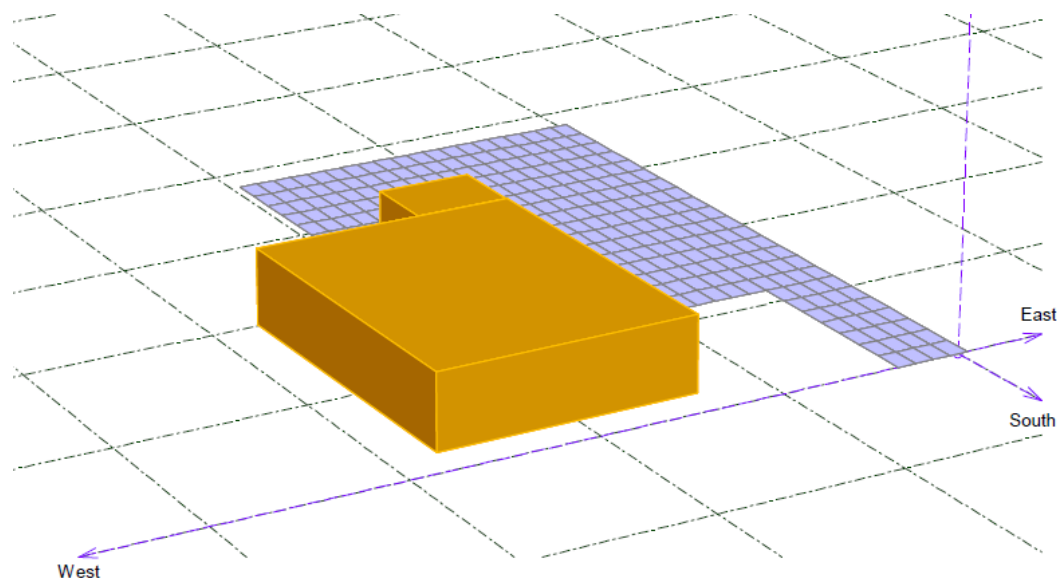
modelirana su na jednak način kao i u prošloj verziji pa pojedine skice neće biti prikazane.

Tablica 7. Prikaz rezultata simulacija drugog sustava uz nagibe 10° i 34°

	INSTALIRANA SNAGA	UKUPNA CIJENA SUSTAVA (kn, s PDV-om)	PROIZVEDENA ENERGIJA U GODINU DANA (MWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kn/kWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kredit 5% na 25 god.)
2. SUSTAV 10° POLIKRISTALNA	30.6	261 000	34.9	0.40	0.63
2. SUSTAV 34° POLIKRISTALNA	17.6	166 000	21.3	0.36	0.60

3.2.3. 3. Sustav

Treći sustav, označen brojem 3, ima površinu od 431m². S obzirom na to i na ograničenje dimenzija, moguće je instalirati 252 monokristalnih odnosno polikristalnih te 495 modula verzije tanki film (kod nagiba 0°). Sa zapadne strane sustava nalazi se ventilacijski kavez koji uzrokuje gubitke zbog zasjenjenja (Slika 8.)



Slika 8. Izgled trećeg sustava uz nagib 0°

Oni iznose 11.5% zimi odnosno 1.8% ljeti. U tablici 8. prikazani su rezultati simulacija pojedinih tehnologija.

Tablica 8. Prikaz rezultata simulacija 3 tehnologije trećeg sustava

3. SUSTAV 0°	TEHNOLOGIJA	INSTALIRANA SNAGA (kWp)	UKUPNA CIJENA SUSTAVA (kn, s PDV-om)	PROIZVEDENA ENERGIJA U GODINI DANA (MWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kn/kWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kredit 5% na 25 god.)
	MONOKRISTALNI SILICIJ	70.6	750 000	72.7	0.51	0.83
	POLIKRISTALNI SILICIJ	64.3	597 000	66.5	0.45	0.73
	TANKI FILM	37.1	487 000	42.2	0.56	0.91

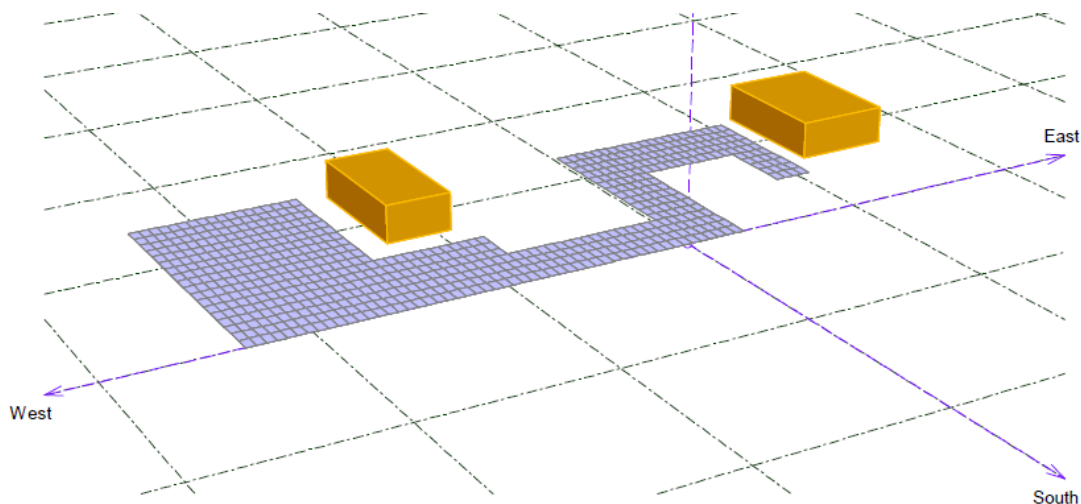
Za sustave pod nagibima iskorištenje površine iznosi 68.7% za 10° i 40.9% za 34°. Rezultati su prikazani u tablici 9.

Tablica 9. Prikaz rezultata simulacija trećeg sustava uz nagibe 10° i 34°

	INSTALIRANA SNAGA	UKUPNA CIJENA SUSTAVA (kn, s PDV-om)	PROIZVEDENA ENERGIJA U GODINU DANA (MWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kn/kWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kredit 5% na 25 god.)
3. SUSTAV 10° POLIKRISTALNA	44.9	415 000	51.7	0.40	0.65
3. SUSTAV 34° POLIKRISTALNA	26.8	263 000	32.4	0.39	0.64

3.2.4. 4. Sustav

Četvrti je sustav površinom značajno veći od ostalih, iznosa 1070 m². Moguće je instalirati 660 monokristalnih i polikristalnih, odnosno 1260 modula varijante tanki film (0°). Na slici 9. Vidi se da postoje 2 objekta koja stvaraju gubitke zbog zasjenjenja.



Slika 9. Izgled četvrtog sustava uz nagib 0°

Gubici iznose 0.8% zimi i 1.6 % ljeti. Oni su gotovo zanemarivi iz razloga što su ventilacijski kavezi dovoljno udaljeni od sustava, a i on sam vrlo je velik pa se to toliko ne primjećuje. Tablica 10. pokazuje rezultate dobivene simulacijama ovog sustava.

Tablica 10. Prikaz rezultata simulacija 3 tehnologije četvrtog sustava

4. SUSTAV 0°	TEHNOLOGIJA	INSTALIRANA SNAGA (kWp)	UKUPNA CIJENA SUSTAVA (kn, s PDV-om)	PROIZVEDENA ENERGIJA U GODINI DANA (MWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kn/kWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kredit 5% na 25 god)
	MONOKRISTALNI SILICIJ	185	1 968 000	191	0.46	0.78
	POLIKRISTALNI SILICIJ	168	1 543 000	177	0.44	0.71
	TANKI FILM	94.5	1 241 000	111	0.54	0.89

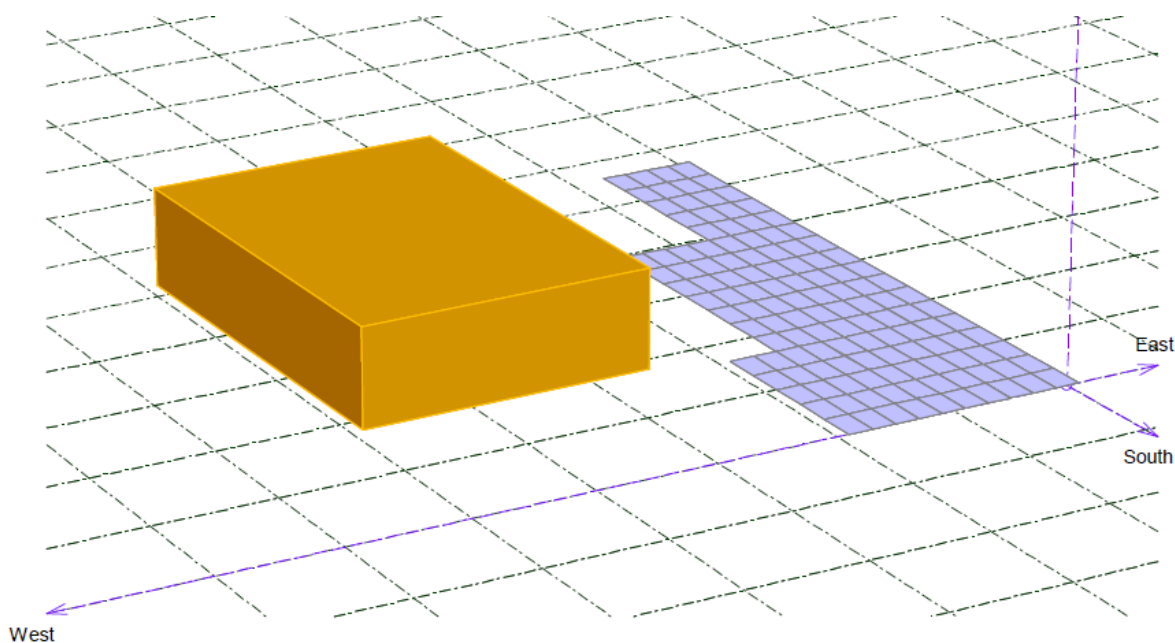
Za sustave pod nagibima, iskorištenje površine iznosi 61.6% za 10° odnosno 40.43% za 34°. Rezultati simulacija prikazani su u tablici 11.

Tablica 11. Prikaz rezultata simulacija četvrtog sustava uz nagibe 10° i 34°

	INSTALIRANA SNAGA	UKUPNA CIJENA SUSTAVA (kn, s PDV-om)	PROIZVEDENA ENERGIJA U GODINU DANA (MWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kn/kWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kredit 5% na 25 god.)
4. SUSTAV 10° POLIKRISTALNA	106	969 000	122	0.40	0.65
4. SUSTAV 34° POLIKRISTALNA	67.3	621 000	82.3	0.39	0.62

3.2.5. 5. Sustav

Peti sustav površinom je najmanji. Ona iznosi 210 m². Moguće je instalirati 126 monokristalnih, tj. polikristalnih modula, odnosno 252 modula verzije tanki film (0°). Na slici 10. može se vidjeti sustav s objektom koji stvara gubitke zbog zasjenjenja.



Slika 10. Izgled petog sustava uz nagib 0°

Oni iznose 0.9% zimi, odnosno 2.4% ljeti.

U tablici 12. prikazani su rezultati simulacije.

Tablica 12. Prikaz rezultata simulacija 3 tehnologije petog sustava

5. SUSTAV 0°	TEHNOLOGIJA	INSTALIRANA SNAGA (kWp)	UKUPNA CIJENA SUSTAVA (kn, s PDV-om)	PROIZVEDENA ENERGIJA U GODINI DANA (MWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kn/kWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kredit 5% na 25 god)
	MONOKRISTALNI SILICIJ	35.3	387 000	36.3	0.51	0.84
	POLIKRISTALNI SILICIJ	32.1	317 000	33.4	0.47	0.76
	TANKI FILM	18.9	245 000	21.6	0.55	0.90

Iskoristivost površine za sustave pod nagibom iznosi 66.67% za 10° i 41.27% za 34° te iz tog proizlaze rezultati prikazani u tablici 13.

Tablica 13. Prikaz rezultata simulacija petog sustava uz nagibe 10° i 34°

	INSTALIRANA SNAGA	UKUPNA CIJENA SUSTAVA (kn, s PDV-om)	PROIZVEDENA ENERGIJA U GODINU DANA (MWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kn/kWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kredit 5% na 25 god)
5. SUSTAV 10° POLIKRISTALNA	21.4	173 000	24.5	0.36	0.58
5. SUSTAV 34° POLIKRISTALNA	13.3	130 000	16	0.33	0.58

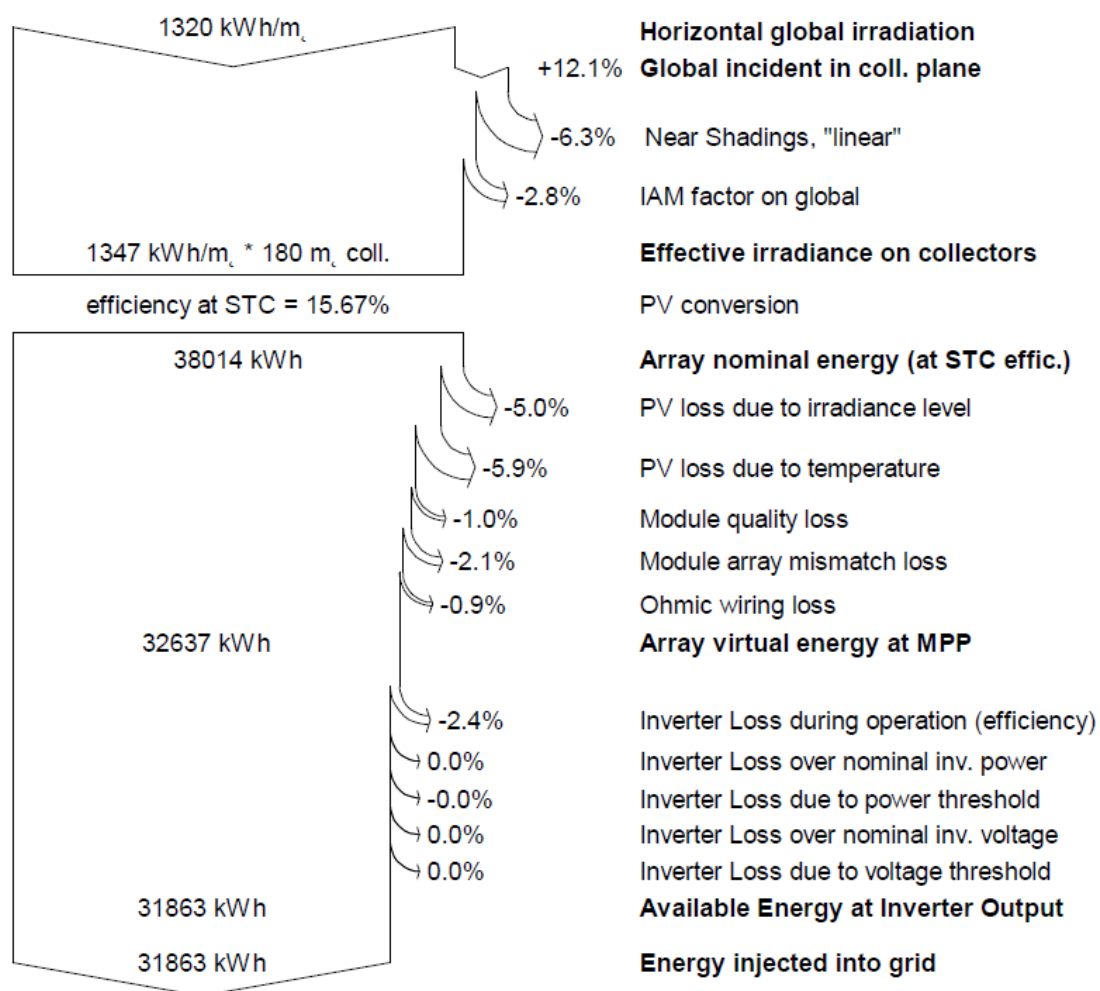
3.3. Osvrt na dobivene rezultate

Prvo što je vidljivo je da se krajnje cijene proizvedene električne energije istom tehnologijom mogu razlikovati među sustavima, bez obzira što su oni smješteni na istoj lokaciji, gdje je ista ozračenost. Te razlike nastaju najvećim dijelom zbog različitog zasjenjenja pojedinog sustava od strane modeliranih objekata.

Uspoređujući dobivene rezultate za sustave s različitim tehnologijama može se primijetiti određena promjena u odnosu na rezultate dobivene istraživanjem u sklopu Projekta. Naime, ranije je navedeno da su tamo u obzir uzete okvirne cijene sustava dok su ovdje korištene cijene koje trenutno vrijede na lokalnom tržištu. Dobiveno je da su trenutne cijene sustava puno niže nego u Projektu. Odnos cijena kompletnih sustava nije se promijenio, monokristalna verzija i dalje je najskuplja, polikristalna varijanta je u sredini, dok je verzija tankog filma najjeftinija. Isti odnos vrijedi i za instalirane snage i količinu proizvedene električne energije. Međutim, promijenio se odnos cijena proizvedene energije. Tako ispada da je najskuplja električna energija proizvedena sustavom varijante tanki film, zatim ide monokristalna verzija dok je najjeftinija energija proizvedena polikristalnim sustavom. To se može objasniti situacijom na hrvatskom tržištu i zastupljenošću pojedine tehnologije. Budući da je tehnologija tankog filma najmanje zastupljena, to se odražava kroz drugačiji odnos cijena te varijante u usporedbi s drugima. Tako ispada da je cijena po vatu modula od tankog filma veća od ostalih varijanti.

S druge strane, analizirajući sustave pod različitim nagibima, rezultati ispadaju očekivani. Horizontalni sustav ima najviše instalirane snage pa time i najveću cijenu. Proizvodi najviše električne energije, ali je kod njega omjer proizvedene energije i instalirane snage najmanji pa je stoga i cijena kilovatsata u toj varijanti najveća. Obrnuta situacija je kod nagiba od 34° . Tu je najmanje instalirane snage, najmanje proizvedene energije, ali je omjer proizvedene električne energije po jedinici snage najveći i stoga je cijena kilovatsata u ovoj varijanti najmanja. Sustav pod nagibom od 10° je u sredini između spomenute 2 varijante.

Što se gubitaka tiče, PVSyst ih također precizno izračuna i u izvještaju prikaže u obliku grafa gubitaka na godišnjoj razini. Primjer tog grafa za slučaj sustava nagiba 34° na 1. površini prikazan je na slici 11. On na ulazu prikazuje ozračenost na horizontalnu površinu koja se uvećava za određen iznos (12.1%) zbog pogodnijeg nagiba modula. Nakon toga prema ukupnoj površini modula i njihovoj učinkovitosti te gubicima (zbog zasjenjenja i sl.) računa energiju proizvedenu u godini dana na njihovom izlazu. U donjem dijelu grafa se od tog iznosa oduzimaju gubici uslijed smanjenja efikasnosti modula (kod slabijeg zračenja te zbog povećanja temperature), gubici u inverteru i sl. Na kraju je naveden konačan iznos proizvedene energije.



Slika 11. Prikaz gubitaka prvog sustava pod nagibom 34°

Na kraju ovog dijela, tablica 14. prikazuje sumarno stanje za cijeli krov (svih 5 površina zajedno). Zbog preglednosti, prikazana je samo polikristalna varijanta, ali za sva 3 nagiba, kako bi se vidjela razlika među njima.

Tablica 14. Sumarni rezultati svih petero sustava zajedno

NAGIB	INSTALIRANA SNAGA	UKUPNA CIJENA SUSTAVA (kn, s PDV-om)	PROIZVEDENA ENERGIJA U GODINU DANA (MWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kn/kWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kredit 5% na 25 god)
0°	380.1	3 523 000	396	0.45	0.72
10°	251.1	2 260 000	285.8	0.4	0.65
34°	153.1	1 445 000	183.9	0.38	0.62

4. SPVH – Solar Powered Vernacular House

Nakon analize velikih fotonaponskih sustava, u ovom poglavlju naglasak će biti na manjim sustavima, primjerenijima za instalaciju na obiteljske kuće. Kao i u prethodnom poglavlju, prvo će se odrediti dostupne površine pogodne za instalaciju sustava. Također će se analizirati tri tehnologije, ali razlika je u tome što u ovom slučaju postoje fiksne orijentacije i nagibi sustava određeni pojedinom površinom. Rezultati simulacija će također biti prikazani u tablicama te analizirani i uspoređeni.

4.1. Općenito o SPVH

Ovaj dio rada odnosi se na SPVH, *Solar Powered Vernacular House*. Kao što je već spomenuto u uvodu, riječ je o projektu američko – njemačkog umjetnika, Davida Smithsona, čija je izvedba planirana 2017. godine na sjevernom dijelu krova Muzeja (Slika 12). SPVH je zamišljena kao tradicionalna hrvatska kuća na čijim bi svim vanjskim površinama (izuzev sjeverne strane) bili instalirani fotonaponski sustavi. Ona bi također bila poseban umjetnički paviljon Muzeja, otvoren za posjetitelje. Cilj samog projekta je promoviranje obnovljivih izvora energije te održivog načina života, ali i potaknuti diskusiju o otvorenim pitanjima i problemima te najboljem pristupu.



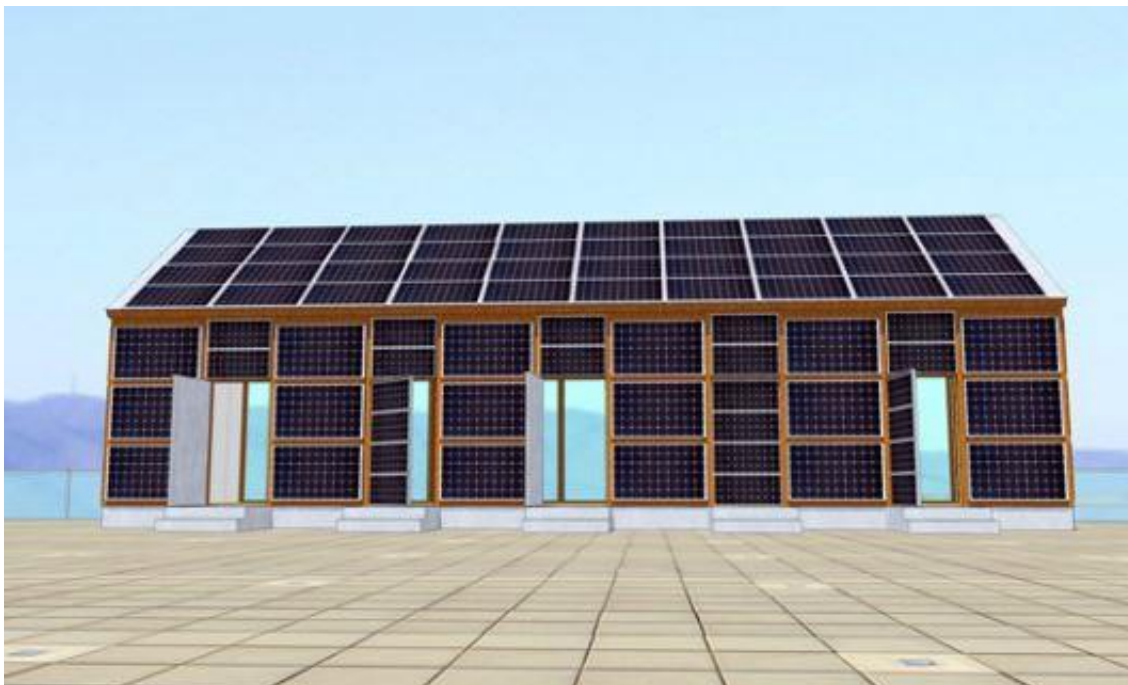
Slika 12. Satelitska snimka Muzeja [4]

Zadatak ovog dijela projekta je projektirati fotonaponske sustave koji bi bili instalirani na SPVH te analizirati njihove energetske i ekonomske parametre. Navedeno je, kao i u prvom dijelu, potrebno ispitati za tri različite tehnologije izrade fotonaponskih ćelija. Rezultati analize bit će pregledno prikazani u tablicama kako bi bilo moguće vidjeti razlike u proizvodnji električne energije, cijeni te konačnoj ekonomičnosti pojedinog sustava.

Budući da je SPVH zamišljena kao tradicionalna kuća, takav će biti i njen izgled i na temelju toga će se odrediti površine pogodne za postavljanje fotonaponskih modula. Prema tome, pogodne su 4 površine na kojima će biti paneli: južna strana krova, južni (veći) zid te bočni zidovi orijentirani na istok i zapad (slika 13., 14.). Na preostale 2 površine nema smisla postavljati panele jer su orijentirane prema sjeveru. One će biti ostakljene i pružat će predivan pogled prema centru grada i Sljemenu u daljini, a istovremeno će biti i izvor svjetlosti za unutrašnjost kuće budući da ostale površine neće imati prozore.



Slika 13. SPVH [1]



Slika 14. SPVH – pogled s južne strane [1]

4.2. Definiranje potrebne opreme za pojedini sustav

Sustavi na SPVH mnogo su manji nego oni analizirani u prethodnom poglavlju, na krovu Muzeja. Iz tog razloga ima znatno više instaliranih sustava ovakve veličine pa je puno lakše doći do konkretnih ponuda i cjenika svih potrebnih dijelova [7]. Na taj će način biti moguće odrediti točan broj pojedinih sastavnica pa prema tome i točniju konačnu cijenu sustava. U sljedećim tablicama prikazan je način odabira opreme te izračun cijene sustava za svaku od tri tehnologija na krovu SPVH. Cijene pojedinih sastavnica određene su u skladu s katalozima opreme [6].

1) MONOKRISTALNA VARIJANTA

Tablica 15. Odabrana oprema s cijenama za monokristalnu varijantu krova

DIO SUSTAVA	KOLIČINA	JEDINIČNA CIJENA	CIJENA (kn)
Yingli Solar YL280C-30B 60-255	39	1 584	61 776
SMA Mini Central 1000TL	1	7 600	7 600
Nosači	39	269	10 491
Spojna kutija s prenaponskom zaštitom	1	3 000	3 000
Kabeli	400	9,5	3 800
Razvodna kutija, sklopke, zaštita i ostalo	1	10 000	10 000
Radovi	1	20 000	20 000
UKUPNO			116 667
+PDV			29 167
UKUPNO s PDV-om			145 834

2) POLIKRISTALNA VARIJANTA

Tablica 16. Odabrana oprema s cijenama za polikristalnu varijantu krova

DIO SUSTAVA	KOLIČINA	JEDINIČNA CIJENA	CIJENA
Solvis SV 60-255	39	1 150	44 850
SMA Mini Central 1000TL	1	7 400	7 400
Nosači	39	269	10 491
Spojna kutija s prenaponskom zaštitom	1	3 000	3 000
Kabeli	400	9,5	3 800
Razvodna kutija, sklopke, zaštita i ostalo	1	10 000	10 000
Radovi	1	20 000	20 000
UKUPNO			99 541
+PDV			24 885
UKUPNO s PDV-om			124 426

3) VARIJANTA TANKI FILM

Tablica 17. Odabrana oprema s cijenama za krov varijante tanki film

DIO SUSTAVA	KOLIČINA	JEDINIČNA CIJENA	CIJENA
Yingli Solar YL280C-30B 60-255	77	559	43 043
SMA Sunny Boy SB 6000	1	7 900	7 900
Nosači	77	134	10 318
Spojna kutija s prenaponskom zaštitom	1	3 000	3 000
Kabeli	400	9,5	3 800
Razvodna kutija, sklopke, zaštita i ostalo	1	10 000	10 000
Radovi	1	20 000	20 000
UKUPNO			98 061
+PDV			24 515
UKUPNO s PDV-om			122 576

Kod varijante tankog filma potrebno je napomenuti da su moduli duplo manji nego kod ostale dvije verzije. Budući da je cijena nosača izražena po jednom modulu, u ovoj bi varijanti nosači bili duplo skuplji pa bi to unijelo dodatnu razliku u ekonomičnosti, koja ne bi bila direktna posljedica razlika u tehnologijama. Stoga je ovdje napravljena iznimka i uzeto je u obzir da je cijena nosača za jedan modul duplo manja nego u ostalim varijantama. Na taj je način dobivena ista cijena nosača za sve varijante.

Cijene sustava za ostale površine (južni, zapadni te istočni zid) dobivene su na ekvivalentan način pa se neće detaljno prikazivati, samo će konačna cijena biti navedena u tablicama s rezultatima.

4.3. Analize sustava

Na SPVH će se analizirati 4 zasebna sustava, tj. na svakoj od 4 površina bit će instaliran jedan sustav. Na taj će način biti moguće uvidjeti razlike na energetskej i ekonomskoj razini koje nastaju na sustavima koji nisu orijentirani na jug te nisu ni blizu optimalnom kutu odklona. Orijentacija sustava se iskazuje kutom azimuta. On iznosi -90° za istok, 90° za zapad dok je jug na 0° . Budući da u blizini SPVH nema ni jednog objekta, gubitaka od zasjenjenja neće biti.

4.3.1. Krov

Prema nacrtu, krov kuće površine je 69.39 m^2 . Azimut je 0° . Na nju je moguće instalirati 40 polikristalnih i monokristalnih, odnosno 78 modula varijante tanki film. Rezultati simulacija prikazani su u tablici 18.

Tablica 18. Prikaz sve 3 tehnologije na krovu

KROV	TEHNOLOGIJA	INSTALIRANA SNAGA (kWp)	UKUPNA CIJENA SUSTAVA (kn, s PDV-om)	PROIZVEDENA ENERGIJA U GODINI DANA (MWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kn/kWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kredit 5% na 25 god)
	MONOKRISTALNI SILICIJ	10.9	145 834	13	0.54	0.89
	POLIKRISTALNI SILICIJ	9.9	124 426	12	0.52	0.84
	TANKI FILM	5.8	122 576	7.4	0.75	1.27

4.3.2. Zid jug

Površina južnog zida je 58.68 m². S obzirom na to, rezultati simulacije za ovu površinu prikazani su u tablici 19.

Tablica 19. Prikaz sve 3 tehnologije na južnom zidu

ZID JUG	TEHNOLOGIJA	INSTALIRANA SNAGA (kWp)	UKUPNA CIJENA SUSTAVA (kn, s PDV-om)	PROIZVEDENA ENERGIJA U GODINI DANA (MWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kn/kWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kredit 5% na 25 god)
	MONOKRISTALNI SILICIJ	9.2	120 433	7.04	0.83	1.39
	POLIKRISTALNI SILICIJ	8.4	109 406	6.4	0.78	1.31
	TANKI FILM	4.9	108 469	4.1	1.14	1.95

4.3.3. Zid istok

U slučaju istočnog zida azimut iznosi -90°, a nagib panela 90°. Površina iznosi 21 m².

Tablica 20. Prikaz sve 3 tehnologije na istočnom zidu

ZID ISTOK	TEHNOLOGIJA	INSTALIRANA SNAGA (kWp)	UKUPNA CIJENA SUSTAVA (kn, s PDV-om)	PROIZVEDENA ENERGIJA U GODINI DANA (MWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kn/kWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kredit 5% na 25 god)
	MONOKRISTALNI SILICIJ	3.4	60 044	2	1.30	2.23
	POLIKRISTALNI SILICIJ	3.1	53 534	1.86	1.23	2.13
	TANKI FILM	1.5	45 337	1	1.87	3.24

4.3.4. Zid zapad

U slučaju zapadnog zida azimut i nagib panela iznose po 90° pa je situacija vrlo slična kao i kod istočnog zida. Površina je ista kao i kod istočnog zida, tj. 21 m².

Tablica 21. Prikaz sve 3 tehnologije na zapadnom zidu

ZID ZAPAD	TEHNOLOGIJA	INSTALIRANA SNAGA (kWp)	UKUPNA CIJENA SUSTAVA (kn, s PDV-om)	PROIZVEDENA ENERGIJA U GODINI DANA (MWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kn/kWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kredit 5% na 25 god)
	MONOKRISTALNI SILICIJ	3.4	60 044	1.99	1.31	2.24
	POLIKRISTALNI SILICIJ	3.1	53 534	1.85	1.24	2.14
	TANKI FILM	1.5	45 337	1	1.89	3.28

4.4. Osvrt na rezultate analiza

Analiza različitih tehnologija na istim površinama provedena je kod velikih sustava, u prvom dijelu rada. Ovdje se pojavljuju isti odnosi. Zanimljivije je pratiti promjenu cijena proizvedene električne energije sustavima na različitim površinama. Ona je, logično, najmanja kod sustava na krovu kuće. To je, očekivano, najpovoljnija površina za postavljanje panela jer je orijentirana prema jugu i ima nagib od 39°, što je vrlo blizu optimalnog kuta od 34°. Nešto veća cijena ispada na sustavu instaliranom na južni zid. Pozitivna strana ove površine je njezina orijentacija prema jugu, tj. azimut od 0°, dok je negativna strana kut nagiba koji iznosi 90°, što je nekoliko puta više od optimalnog godišnjeg pa zbog tog nastaju te razlike. Najlošija situacija je na istočnom i zapadnom zidu. Tamo su i nagib (90°) i azimut (±90°) daleko od optimalnih.

Te okolnosti već značajno utječu na proizvodnju električne energije te je na tim površinama cijena proizvedene električne energije najveća.

Zanimljiva je usporedba sustava na krovu kuće s velikim sustavima pod nagibom od 34° iz prvog dijela rada. Oni su prema orijentaciji zapravo vrlo slični – imaju jednak kut azimuta, a kut nagiba im se razlikuje svega za 4°. Međutim, cijena električne energije proizvedene sustavom na kući dosta je veća. Razlog tome je što je cijena opreme (nosača i sl.) za male integrirane sustave (npr. na krovu kuće) puno veća nego kod većih sustava. Razlika bi bila i veća da je u proračun cijena velikih sustava u prvom dijelu rada uključen popust na veću količinu modula.

U tablici 22. prikazana je sumarna tablica po tehnologijama za cijeli projekt SPVH.

Tablica 22. Sumarna tablica za sve površine i sve tehnologije na SPVH

SPVH	TEHNOLOGIJA	INSTALIRANA SNAGA (kWp)	UKUPNA CIJENA SUSTAVA (kn, s PDV-om)	PROIZVEDENA ENERGIJA U GODINI DANA (MWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kn/kWh)	CIJENA PROIZVEDENE ENERGIJE (kredit 5% na 25 god)
	MONOKRISTALNI SILICIJ	26.9	386 365	24.03	0.75	1.26
	POLIKRISTALNI SILICIJ	24.5	340 900	21.5	0.73	1.23
	TANKI FILM	13.7	321 719	13.5	1.04	1.77

5. Zaključak

Zadatak ovog Završnog rada bio je ispitati energetske i ekonomske karakteristike fotonaponskih sustava u ovisnosti o tehnologiji i orijentaciji. S obzirom na to, rezultati se mogu podijeliti u dva dijela.

Analizirajući sustave koji se međusobno razlikuju po različitim tehnologijama izrade fotonaponskih ćelija, rezultati pokazuju da je optimalno, a i ekonomski najisplativije odabrati varijantu polikristalnog silicija. Ukoliko je bitno da se na ograničenoj površini dobije što više energije, tada se odabire monokristalni silicij. Izbor varijante tankog filma jedino bi bio opravdan u uvjetima nedostatka novca za ostale varijante jer je ona najjeftinija što se tiče početne cijene sustava, ali dugoročno gledano je najmanje isplativa.

Što se tiče razlika koje nastaju između jednakih sustava, ali različitih nagiba, rezultati pokazuju da je, očekivano, najisplativija varijanta optimalnog godišnjeg nagiba (34°). Međutim, ukoliko je glavni kriterij odabira sustava količina proizvedene energije na ograničenoj površini bez obzira na isplativost, tada u obzir dolaze sustavi s horizontalno postavljenim modulima. Kod njih se postiže najveća instalirana snaga na nekoj ograničenoj površini i iznos proizvedene energije je najveći. Sustavi nagiba 10° se po proizvedenoj energiji i isplativosti nalaze između horizontalnih i onih s optimalnim nagibom.

Na kraju je potrebno napomenuti da razlika u cijenama po kilovatsatu dobivenih simulacijama sustava u ovom radu nije uvijek toliko velika tako da bi izbor drugih panela i eventualna promjena cijena na tržištu mogli dovesti do promjene ekonomski optimalne tehnologije.

6. Literatura, izvori i reference

- [1] Službena stranica Davida Smithsona:
http://www.davidsmithson.net/pavilion_zb.htm
- [2] PVSyst: <http://www.pvsyst.com/en/>
- [3] PVGIS:
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=en&map=europe>
- [4] Muzej suvremene umjetnosti: <http://www.msu.hr/>
- [5] Predavanja o energiji Sunca iz predmeta Energijske tehnologije:
<http://www.fer.unizg.hr/predmet/eneteh>
- [6] Cjenik opreme za fotonaponske sustave
<http://www.solarni-paneli.hr/pdf/cjenik.pdf>
- [7] Ponuda s cjenikom za fotonaponski sustav od 10 kW
http://www.schrack.hr/fileadmin/f/hr/Bilder/Produkte_Shop/Photovoltaik/Tips_ka_elektrana_10_kW_Schrack_-_v3_05_2013.zip

7. Sažetak

Zadatak ovog rada bio je projektirati fotonaponske sustave različitih karakteristika (veličina, tehnologija i orijentacija) na dostupnim površinama određene građevine. Sustavi su zatim simulirani i analizirani s obzirom na to kako pojedine karakteristike utječu na njihove energetske i ekonomske parametre. Konačan je cilj rada bio odrediti optimalne konfiguracije sustava za dvije varijante na zgradi. U prvoj je kriterij odabira bio maksimiziranje proizvodnje električne energije, dok je u drugoj varijanti u obzir uzeta isključivo ekonomičnost.

Abstract

The task of this study was to design photovoltaic systems with different characteristics (size, technology and orientation) on available areas of specified building. Then the systems were simulated and analyzed in respect how individual characteristic affect their energy and economic parameters. The main goal of this study was to determine optimal configurations of the systems for two building variants. Maximizing of energy production was criterion of the choice for the first variant, while in the second one only the cost efficiency was taken into account.

8. Ključne riječi

Muzej suvremene umjetnosti

Ozračenost

Kut nagiba

Azimut

Fotonaponska ćelija

Fotonaponski modul

Fotonaponski sustav

Izmjenjivač, Inverter

SPVH

Key words

Museum of Contemporary Art

Irradiance

Slope

Azimuth

Photovoltaic cell

Photovoltaic module

Photovoltaic system

Inverter

SPVH

9. Dodatak

U dodatku će biti prikazan kompletan izvještaj simulacije PVSyst-a za 1. sustav na krovu, horizontalne varijante.

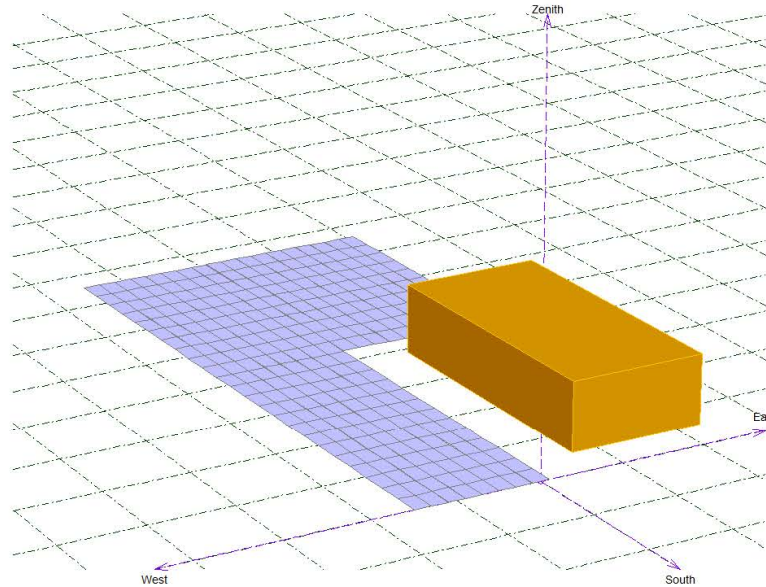
PVSYST V5.55		11/06/15	Page 1/5
Grid-Connected System: Simulation parameters			
Project :	MSU krov		
Geographical Site	Zagreb	Country	Croatia
Situation	Latitude 45.8°N	Longitude	16.0°E
Time defined as	Legal Time Time zone UT+1	Altitude	111 m
	Albedo 0.20		
Meteo data :	Zagreb from PVGIS, Synthetic Hourly data		
Simulation variant :	1. dio		
	Simulation date	05/06/15 11h36	
Simulation parameters			
Collector Plane Orientation	Tilt 0°	Azimuth	0°
Horizon	Free Horizon		
Near Shadings	Linear shadings		
PV Array Characteristics			
PV module	Si-poly	Model	SV 60-255
	Manufacturer	Solvis	
Number of PV modules	In series	22 modules	In parallel 13 strings
Total number of PV modules	Nb. modules	286	Unit Nom. Power 255 Wp
Array global power	Nominal (STC)	72.9 kWp	At operating cond. 66.2 kWp (50°C)
Array operating characteristics (50°C)	U mpp	618 V	I mpp 107 A
Total area	Module area	468 m₂	
Inverter			
	Model	Sunny Tripower 20000 TLHE	
	Manufacturer	SMA	
Characteristics	Operating Voltage	580-800 V	Unit Nom. Power 20.0 kW AC
Inverter pack	Number of Inverter	3 units	Total Power 60.0 kW AC
PV Array loss factors			
Thermal Loss factor	Uc (const)	20.0 W/m ₂ K	Uv (wind) 0.0 W/m ₂ K / m/s
=> Nominal Oper. Coll. Temp. (G=800 W/m ₂ , Tamb=20°C, Wind=1 m/s.)			NOCT 56 °C
Wiring Ohmic Loss	Global array res.	96 mOhm	Loss Fraction 1.5 % at STC
Module Quality Loss			Loss Fraction 1.0 %
Module Mismatch Losses			Loss Fraction 2.0 % at MPP
Incidence effect, ASHRAE parametrization	IAM = 1 - bo (1/cos i - 1)	bo Parameter	0.05
User's needs :	Unlimited load (grid)		

Grid-Connected System: Near shading definition

Project : MSU krov
Simulation variant : 1. dio

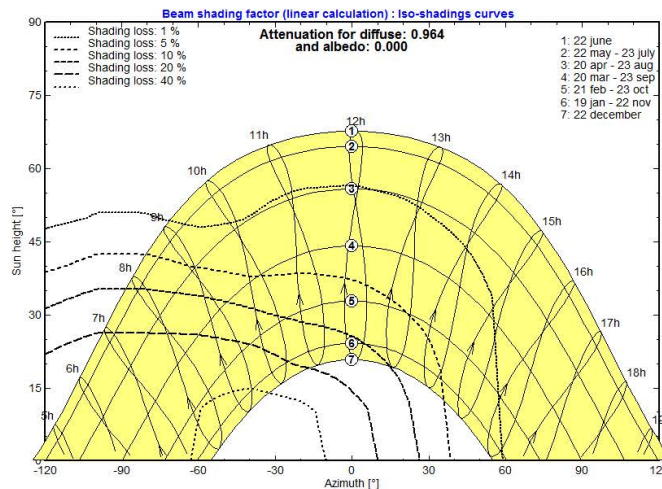
Main system parameters	System type	Grid-Connected		
Near Shadings	Linear shadings			
PV Field Orientation	tilt	0°	azimuth	0°
PV modules	Model	SV 60-255	Pnom	255 Wp
PV Array	Nb. of modules	286	Pnom total	72.9 kWp
Inverter	Model	Sunny Tripower 20000 TLH	Pnom	20.00 kW ac
Inverter pack	Nb. of units	3.0	Pnom total	60.0 kW ac
User's needs	Unlimited load (grid)			

Perspective of the PV-field and surrounding shading scene



Iso-shadings diagram

MSU krov: 1. dio



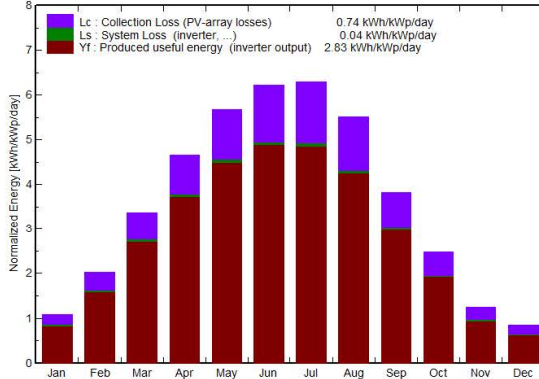
Grid-Connected System: Main results

Project : MSU krov
Simulation variant : 1. dio

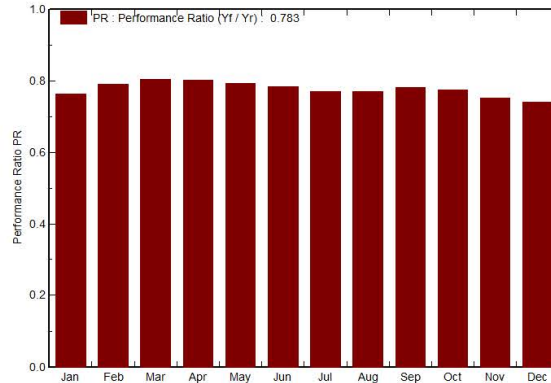
Main system parameters	System type Grid-Connected	
Near Shadings	Linear shadings	
PV Field Orientation	tilt	0° azimuth 0°
PV modules	Model	SV 60-255 Pnom 255 Wp
PV Array	Nb. of modules	286 Pnom total 72.9 kWp
Inverter	Model	Sunny Tripower 20000 TLH Pnom 20.00 kW ac
Inverter pack	Nb. of units	3.0 Pnom total 60.0 kW ac
User's needs	Unlimited load (grid)	

Main simulation results			
System Production	Produced Energy	75.4 MWh/year	Specific prod. 1034 kWh/kWp/year
	Performance Ratio PR	78.3 %	
Investment	Global incl. taxes	668200 kn	Specific 9.16 kn/Wp
Yearly cost	Annuities (Loan 5.0%, 25 years)	47410 kn/yr	Running Costs 7000 kn/yr
Energy cost		0.72 kn/kWh	

Normalized productions (per installed kWp): Nominal power 72.9 kWp



Performance Ratio PR



1. dio
Balances and main results

	GlobHor kWh/m _i	T Amb °C	GlobInc kWh/m _i	GlobEff kWh/m _i	EArray MWh	E_Grid MWh	EffArrR %	EffSysR %
January	33.8	0.40	33.8	29.2	1.93	1.89	12.23	11.92
February	56.6	1.70	56.6	49.6	3.32	3.26	12.54	12.32
March	104.8	6.60	104.8	94.8	6.25	6.16	12.74	12.56
April	139.8	11.90	139.8	129.3	8.30	8.19	12.68	12.51
May	176.1	16.80	176.1	164.8	10.32	10.18	12.52	12.35
June	186.9	20.40	186.9	175.5	10.84	10.70	12.39	12.23
July	195.3	22.90	195.3	183.4	11.14	11.00	12.18	12.03
August	171.1	22.40	171.1	159.3	9.75	9.62	12.17	12.01
September	114.9	16.70	114.9	105.0	6.64	6.55	12.34	12.18
October	77.2	12.00	77.2	68.8	4.44	4.37	12.28	12.09
November	37.5	6.90	37.5	32.7	2.11	2.06	12.03	11.74
December	26.3	1.60	26.3	22.6	1.47	1.42	11.93	11.55
Year	1320.2	11.75	1320.2	1214.9	76.49	75.39	12.38	12.20

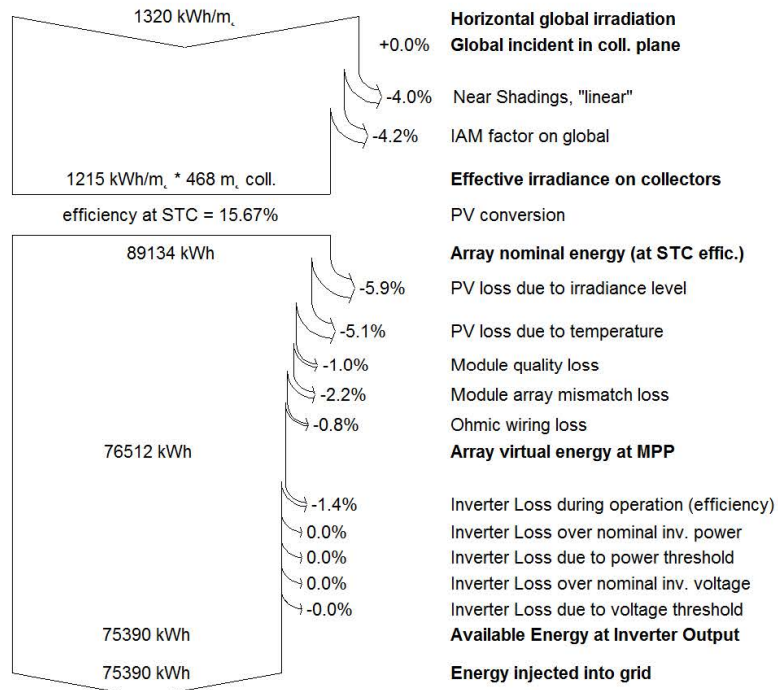
Legends: GlobHor Horizontal global irradiation EArray Effective energy at the output of the array
 T Amb Ambient Temperature E_Grid Energy injected into grid
 GlobInc Global incident in coll. plane EffArrR Effic. Eout array / rough area
 GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings EffSysR Effic. Eout system / rough area

Grid-Connected System: Loss diagram

Project : MSU krov
Simulation variant : 1. dio

Main system parameters	System type	Grid-Connected		
Near Shadings	Linear shadings			
PV Field Orientation	tilt	0°	azimuth	0°
PV modules	Model	SV 60-255	Pnom	255 Wp
PV Array	Nb. of modules	286	Pnom total	72.9 kWp
Inverter	Model	Sunny Tripower 20000 TLH	Pnom	20.00 kW ac
Inverter pack	Nb. of units	3.0	Pnom total	60.0 kW ac
User's needs	Unlimited load (grid)			

Loss diagram over the whole year



Grid-Connected System: Economic evaluation

Project : MSU krov
Simulation variant : 1. dio

Main system parameters	System type	Grid-Connected	
Near Shadings	Linear shadings		
PV Field Orientation	tilt	0°	azimuth 0°
PV modules	Model	SV 60-255	Pnom 255 Wp
PV Array	Nb. of modules	286	Pnom total 72.9 kWp
Inverter	Model	Sunny Tripower 20000 TLH	Pnom 20.00 kW ac
Inverter pack	Nb. of units	3.0	Pnom total 60.0 kW ac
User's needs	Unlimited load (grid)		

Investment

PV modules (Pnom = 255 Wp)	286 units	1150 kn / unit	328900 kn
Supports / Integration		0 kn / module	0 kn
Inverters (Pnom = 20.0 kW ac)	3 units	19900 kn / unit	59700 kn
Settings, wiring, ...			72980 kn
Nosaci			72980 kn
Substitution underworth			-0 kn
Gross investment (without taxes)			534560 kn

Financing

Gross investment (without taxes)			534560 kn
Taxes on investment (VAT)	Rate 25.0 %		133640 kn
Gross investment (including VAT)			668200 kn
Subsidies			-0 kn
Net investment (all taxes included)			668200 kn
Annuities	(Loan 5.0 % over 25 years)		47410 kn/year
Annual running costs: maintenance, insurances ...			7000 kn/year
Total yearly cost			54410 kn/year

Energy cost

Produced Energy	75.4 MWh / year
Cost of produced energy	0.72 kn / kWh