

# Dekarbonizacija kroz hibridne energetske sustave

---

Mirković, Erik

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:910121>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-03**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

**DEKARBONIZACIJA KROZ HIBRIDNE ENERGETSKE  
SUSTAVE**

Rijeka, rujan 2024.

Erik Mirković

0069093916

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

**DEKARBONIZACIJA KROZ HIBRIDNE ENERGETSKE  
SUSTAVE**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Vedran Kirinčić

Rijeka, rujan 2024.

Erik Mirković

0069093916

Rijeka, 07.03.2024.

Zavod:                   Zavod za elektroenergetiku  
Predmet:                Osnove elektrotehnike II

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik:           **Erik Mirković (0069093916)**  
Studij:                Sveučilišni prijediplomski studij elektrotehnike (1030)

Zadatak:              **Dekarbonizacija kroz hibridne energetske sustave / Decarbonization through hybrid energy systems**

### Opis zadatka:

Cilj ovog rada je opis rada hibridnog sustava, koji sadrži elemente za proizvodnju, distribuciju, potrošnju i skladištenje električne energije, odnosno upravljanje energetske tokovima. Potrebno je prikazati tehničke karakteristike i parametre izvedbe različitih tipova hibridnih sustava i kako oni utječu na njihovu prikladnost za implementaciju. Obraditi primjer ugradnje kod kućanstva.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanja diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku:   20.03.2024.

Mentor:  
izv. prof. dr. sc. Vedran Kirinčić

Komentor:  
izv. prof. dr. sc. Rene Prenc

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:  
prof. dr. sc. Dubravko Franković

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**

**TEHNIČKI FAKULTET**

Prijediplomski sveučilišni studij elektrotehnike

**IZJAVA**

U skladu s člankom 10. Pravilnika o završnom radu i završnom ispitu na prijediplomskim sveučilišnim studijima Tehničkog fakulteta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad prema zadatku uručenom 20. ožujka 2024. godine.

Rijeka, rujan 2024.



Erik Mirković

## ZAHVALA

*Zahvaljujem svojem mentoru izv. prof. dr. sc. Vedranu Kirinčiću na susretljivosti i savjetima za izradu ovog završnog rada, kao i svojoj djevojci, obitelji i prijateljima na njihovoj srdačnoj podršci kroz studij.*

# SADRŽAJ

1.	UVOD .....	1
2.	DEKARBONIZACIJA.....	2
3.	HIBRIDNI ENERGETSKI SUSTAVI .....	5
3.1.	Off-grid hibridni energetske sustavi .....	5
3.2.	On-grid hibridni energetske sustavi .....	6
4.	KUĆNI HIBRIDNI PV-BESS ENERGETSKI SUSTAV .....	9
4.1.	Godišnja potrošnja kućanstva.....	9
4.1.1.	Digitalno pametno brojilo Iskraemeco-Mx382 .....	10
4.1.2.	Krivulja potrošnje električne energije u kućanstvu.....	11
4.2.	Analiza sunčanih sati.....	13
4.3.	Solarna elektrana hibridnog energetske sustava .....	14
4.3.1.	Izračun snage.....	14
4.3.2.	Polikristalni silicijski solarni moduli.....	15
4.3.3.	Izmjenjivač .....	16
4.3.4.	Huawei SUN2000-3KTL-M1 solarni izmjenjivač.....	17
4.4.	Baterijski sustav hibridnog energetske sustava.....	18
4.5.	Programski alat PV*SOL .....	20
4.5.1.	Vrsta energetske sustava, klimatski podatci i mrežni priključak.....	21
4.5.2.	Potrošnja.....	22
4.5.3.	3D dizajn .....	23
4.5.4.	Baterijski sustav .....	25
4.5.5.	Strujni krug hibridnog PV-BESS sustava .....	26
4.6.	Rezultati simulacije .....	27
4.6.1.	Podatci o godišnjoj proizvodnji solarne elektrane .....	27
4.6.2.	Podatci o godišnjoj potrošnji u sustavu.....	28
4.6.3.	Podatci o toku energije baterijske sustava .....	30
5.	ZAKLJUČAK .....	32
6.	LITERATURA.....	33
7.	DODATCI.....	36
	SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI.....	36
	SUMMARY AND KEY WORDS .....	38

## 1. UVOD

Svakodnevno se susrećemo s temama klimatskih promjena, obnovljivih izvora energije, smanjenja emisije CO<sub>2</sub> te s raznim varijacijama na tu temu. Svjedoci smo globalnog zatopljenja te nas razni stručnjaci upozoravaju po tom pitanju. Štoviše, usmjeravaju nas na promjenu životnih navika i pokušavaju pobuditi u nama svijest o važnosti očuvanja prirode. U prometu se sve češće susrećemo s električnim automobilima, na kućama vidimo postavljene solarne elektrane, no zapitamo li se uopće koja je svrha postepene elektrifikacije svega što nas okružuje. Postavljanjem solarnih elektrana na kućama, proizvodi se električna energija bez emisije štetnih plinova, također to vrijedi i kod električnih automobila, romobila i svih strojeva ili uređaja koje pogoni električna struja. Ono što je ključno za ovaj problem s klimatskim promjenama je osvijestiti ljude o važnosti dekarbonizacije za okoliš i na neki način ih potaknuti na promjenu, bilo to subvencijama, edukacijama, ili bilo kojom drugom metodom, važno je da se osviještenost kod čovječanstva postigne. Zasiurno bi se puno ljudi tada odlučilo da u svoje kućanstvo ugrade nešto „zeleno“ o čemu su čuli od prijatelja, kolega na poslu ili u medijima. Primjerice, jedan od susjeda ugradi malu solarnu elektranu s baterijom u svoje kućanstvo. Vrlo su velike šanse da će se kroz skorije vrijeme pustiti u pogon i drugi takav energetska sustav u istom tom susjedstvu. Ljudi će iz znatiželje to postavljati u svoja kućanstva, makar ne bili upoznati s prednostima koje ta ugradnja donosi. Kad bi se taj proces tako lančano odvijao u nedogled, ne bi uopće bilo problema za ekologe. Međutim, upravo kroz ovakve hibridne energetske sustave može se napraviti izrazito velik pomak u dekarbonizaciji energetska sektora i uvjeriti čovječanstvo o isplativosti tih sustava.

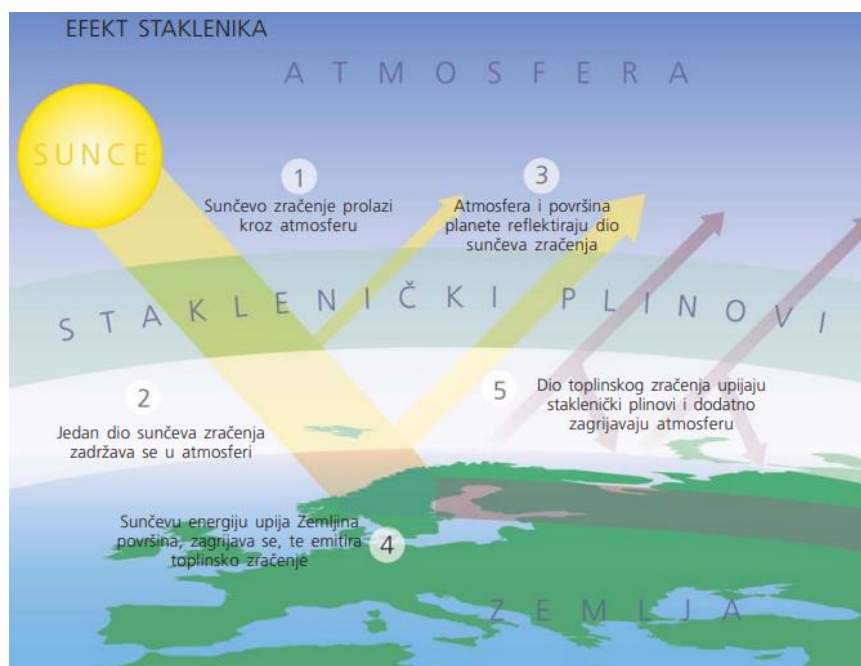
Ovaj će završni rad stoga detaljno opisati dekarbonizaciju kroz hibridne energetske sustave uključujući elemente hibridnih energetska sustava te će naposljetku biti analiziran primjer ugradnje takve vrste sustava u kućanstvu s površinom od 180 m<sup>2</sup> i strujnim priključkom snage 7,36 kW teritorijalno smještenom u Istarskoj županiji.



## 2. DEKARBONIZACIJA

Dekarbonizacija je u posljednje vrijeme postala sve aktualnija tema na globalnoj razini stoga se na nju često nailazi u televizijskim vijestima, o njoj se uči i raspravlja na fakultetima, promišlja i zaključuje na klimatskim kongresima. Međutim, upravo ta tema brine većinu ljudi koji su svjesni opasnosti emisije stakleničkih plinova za planet na kojem živimo.

Staklenički plin koji je u glavnom fokusu raznih ekologa diljem svijeta je ugljikov dioksid ( $\text{CO}_2$ ), koji uz ostale stakleničke plinove prisutne u atmosferi stvara efekt staklenika koji je povoljan energetske-ekološki efekt te omogućuje normalan život na Zemlji. Šume se često nazivaju „plućima Zemlje“ jer su zaslužne za stvaranje kisika koji se dobiva iz ugljikovog dioksida i vode u procesu fotosinteze. Konstantnom sječom šuma i izgradnjom raznih postrojenja u kojima se strojevi većinom pogone neobnovljivim izvorima energije narušava se prirodna ravnoteža. Ovdje nailazimo na problem štetne emisije  $\text{CO}_2$  jer se umjesto održavanjem ravnoteže efekta staklenika znatno smanjuje proizvodnja kisika, a povećava udio  $\text{CO}_2$  što rezultira neželjenim zagrijavanjem našeg planeta. Ova činjenica vrijedi samo za stakleničke plinove nastale čovjekovim djelovanjem. Uz primjenu obnovljivih izvora energije kao što su energija sunca, vjetra, vode, zemljine kore, biomase i sl. taj se neželjeni problem može izbjeći. [1]



Slika 2.1. Prikaz efekta staklenika [1]

Svjedoci smo raznih prosvjeda za klimatske promjene, međutim ni najutjecajniji svjetski političari ne mogu donositi ishitrene odluke kojima bi, primjerice, ukinuli daljnju uporabu fosilnih goriva u svakodnevnom životu. Taj se proces mora odvijati postupno pošto je nafta važan čimbenik svjetskoga gospodarstva, a pogotovo u gospodarstvu država arapskog poluotoka gdje su zalihe nafte najveće stoga bi radikalna promjena zasigurno rezultirala neželjenim posljedicama, kako po te države, tako i po cijeli svijet. Vrlo je razumna činjenica kako će uskoro doći vrijeme kad će se morati u potpunosti prijeći na obnovljive izvore energije, pošto nafte nema beskonačno puno, no ne možemo čekati da se potroši sva nafta jer kapital koji bi bio eventualno zgrnut prodajom te nafte ne može vratiti klimatsko stanje Zemlje na prvobitnu razinu.



*Slika 2.2. Prikaz zagađenja zraka [2]*

Svakako, postoji način na koji se kažnjava pretjerano emitiranje stakleničkih plinova u atmosferu u smislu emisijskih dozvola koje otprilike iznose oko 70 eura po toni emitiranog CO<sub>2</sub>. Primjerice, pretpostavimo da termoelektrana na ugljen nazivne snage 300 MW proizvede oko 2 milijuna MWh električne energije godišnje. Ukoliko ta elektrana po proizvedenom MWh električne energije emitira oko 0,85 tona ugljikovog dioksida, cijena emisijske dozvole za tu termoelektranu iznosit će 120 milijuna eura što razumijemo da nije mali trošak. [3]

Međutim, cijena tih emisijskih dozvola će u budućnosti sve više rasti što će naposljetku rezultirati potpunim prelaskom na obnovljive izvore energije za koji je, osim emisijskih dozvola, najzaslužniji Pariški sporazum. To je klimatski sporazum koji je doveden od strane Ujedinjenih naroda i potpisan od strane članica Europske Unije. Odnosi se na radikalnu restrikciju prema kojoj bi Europska Unija do 2050. godine trebala postati prvo ugljično neutralno gospodarstvo i društvo. [4]

Charles Michel, predsjednik Europskog vijeća, jednom je prilikom izjavio: „Klimatska neutralnost nije više pitanje izbora, ona je, bez sumnje, nužnost!“, što nam dovoljno govori o ozbiljnosti problema i nužnosti dekarbonizacije na globalnoj razini. [4]

### **3. HIBRIDNI ENERGETSKI SUSTAVI**

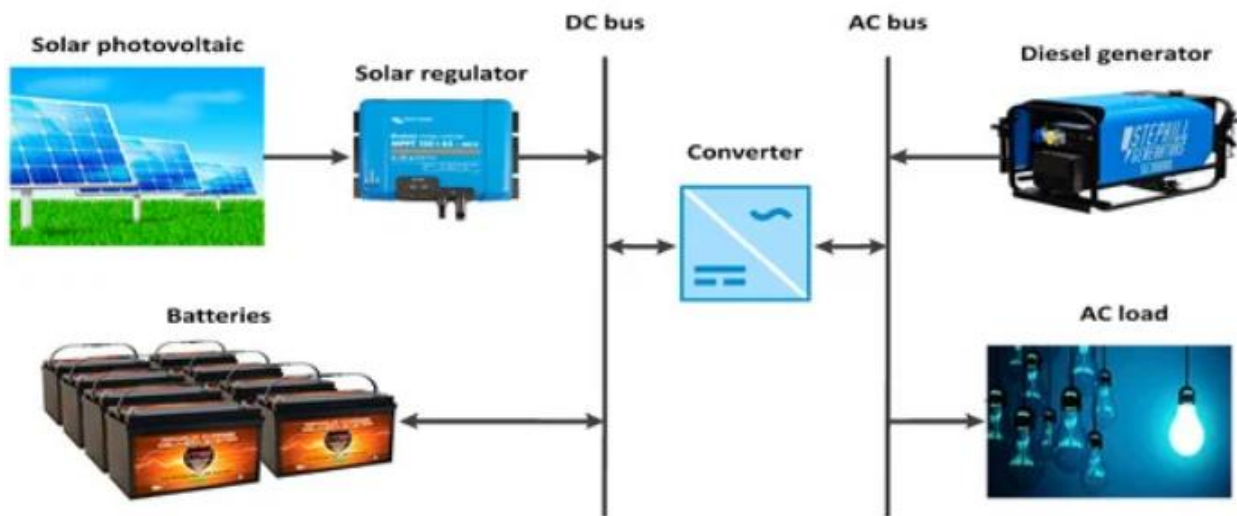
Hibridni energetska sustavi su tehnološki trend prisutan posljednjih nekoliko godina koji povezuje kombinaciju proizvodnje iz više od jednog izvora energije, pohrane i potrošnje proizvedene električne energije. Obnovljivi izvori energije ključni su u proizvodnji energije kod ovakve vrste energetska sustava zbog želje za „zelenom“ proizvodnjom u ovakvim sustavima. Primjerice, kuća sa solarnom elektranom i vjetroelektranom bila bi dobar primjer proizvodnje kod hibridnih energetska sustava. Nadalje, proizvedena se energija nastoji pohraniti u određeni baterijski sustav koji mora biti prethodno dizajniran. Dizajn baterije ovisi isključivo o količini proizvodnje i potrošnji hibridnog energetska sustava pošto je baterija ključni element hibridnog energetska sustava zbog činjenice da mora napajati sustav u trenucima kada proizvodnja energije nije prisutna. Baterija će tada davati u sustav onoliko energije koliko je potrebno za savladati priključeni teret. Postoji slučaj kada baterija nije dovoljno jako sredstvo napajanja zbog premale napunjenosti ili prevelikog tereta pa se tada sustav napaja ili iz ugrađenog dizelskog generatora kojemu je upravo zadaća napajanje u tim slučajevima ili iz elektroenergetske mreže. Razlika između napajanja iz dizelskog generatora i napajanja iz elektroenergetske mreže čini dvije opće vrste hibridnih energetska sustava s obzirom na mrežni priključak a to su:

- a) off-grid hibridni energetska sustavi –nemaju priključak na elektroenergetska mrežu
  - b) on-grid hibridni energetska sustavi – imaju priključak na elektroenergetska mrežu
- [5]

#### **3.1. Off-grid hibridni energetska sustavi**

Off-grid hibridni energetska sustavi predstavljaju takvu vrstu sustava koja je neovisna o mrežnom priključku. Većinom ovakvu vrstu sustava pronalazimo na područjima gdje nema mogućnosti priključka elektroenergetska mreži. Vjerojatno smo puno puta naišli na vikendicu neposredno blizu mora na kojoj vidimo solarnu elektranu, a znamo da nema mogućnost mrežnog priključka zbog slabo razvijene infrastrukture na tom području. Možemo zaključiti kako je to idealan primjer za ovu vrstu hibridnih energetska sustava. Solarna elektrana postavljena na krovu vikendice proizvodi električnu energiju za vrijeme sunčanih sati koja se zatim pohranjuje u bateriju unaprijed predviđenu za opskrbu energijom u vrijeme

oblačnih ili kišnih dana kad proizvodnja izostane. Uzima se u obzir i činjenica da vikendica ne troši odmah svu proizvedenu energiju pošto u vikendicama najčešće ne nailazimo na trošila velike snage koja bi mogla činiti problem u opskrbi električnom energijom. Postoji slučaj kada nema dovoljno energije u bateriji za opskrbu zbog neočekivano povećane potrošnje. Tada sustav energijom opskrbljuje dizelski generator koji kemijsku energiju dobivenu iz nafte pretvara u električnu energiju te tako napaja sustav.

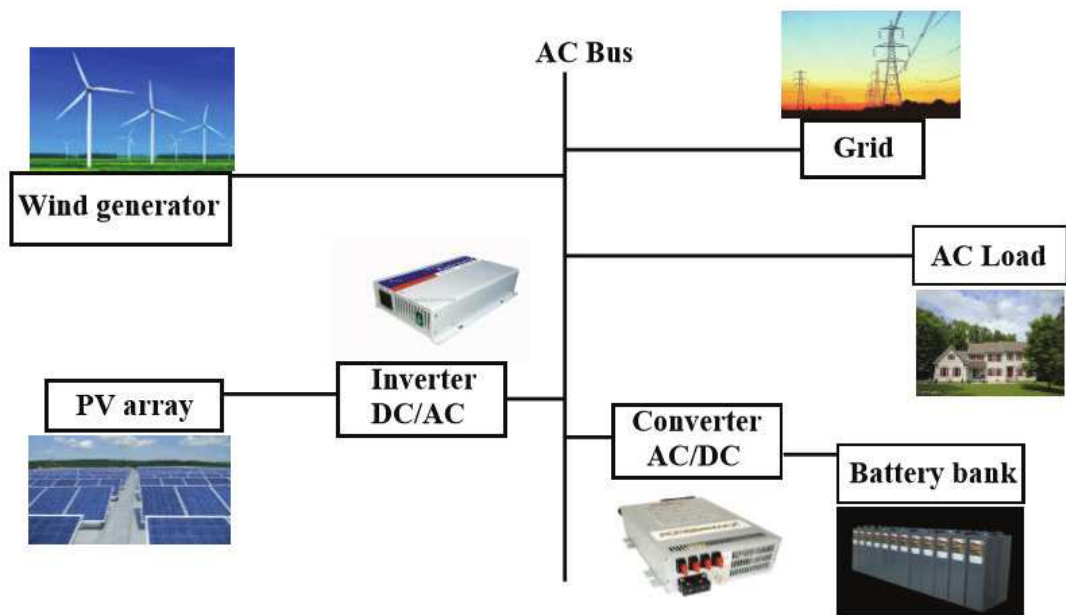


Slika 3.1. Prikaz strukture off-grid sustava [6]

### 3.2. On-grid hibridni energetske sustavi

On-grid hibridni energetske sustavi su, za razliku od prethodnih, puno zastupljenija vrsta hibridnih energetske sustava. Osnovna razlika u odnosu na prethodnu vrstu je mrežni priključak što nam ukazuje i sam engleski naziv „on-grid“ što u doslovnom prijevodu znači „na mreži“. Dva čimbenika koja odlikuju on-grid sustave i radi kojih se ljudi odlučuju upravo na njih su ekonomičnost te ekološka održivost. Svakoj je osobi u interesu platiti čim manji račun za struju, ali ne odlučuje se svatko na ugradnju solarne elektrane i vjetroelektrane u svoj dom. Potrebno je započeti tu investiciju ulaganjem određene sume novca koja većini ljudi predstavlja određeni rizik pošto sumnjaju u isplativost. Izuzetno je dobro za razvoj hibridnih sustava postojanje raznih subvencija od lokalne pa čak do europske razine jer bi se inače mnogo ljudi bojalo napraviti početni korak u izgradnji svoje male elektrane. Svakodnevno vidimo solarne elektrane na

krovovima kuća, ali jesmo li kao čovječanstvo svjesni kakav bi to korak u energetskej tranziciji bio kada bi svako kućanstvo sagradilo svoju malu elektranu. Primjerice, obiteljska kuća na Krku ima veliki broj sunčanih sati i dovoljnu količinu vjetra za izgradnju solarne i vjetroelektrane na njoj. Vlasnici kuće odluče se na on-grid hibridni energetski sustav. Otok Krk ima dobro razvijenu infrastrukturu i može se, za razliku od off-grid sustava ostvariti mrežni priključak. Upravo mrežni priključak uz različite vrste proizvodnje iz obnovljivih izvora energije te uz baterijski sustav opisuje on-grid hibridni energetski sustav. Zamislimo da na otoku Krku dva tjedna pada kiša pa solarna elektrana ne proizvodi dovoljno električne energije za pohranu u bateriju, a vjetar također izostaje pa je spriječena i mogućnost pokretanja vjetroelektrane. Baterija tada neće biti iskoristiva noću ili u slučaju povećanog tereta sustava pošto će se sva energija dobivena iz solarne elektrane danju direktno iskorištavati na trošilima spojenima u sustav. Poznato je da se proizvodnja solarne elektrane za oblačnih dana u odnosu na sunčane znatno smanji. Međutim, zahvaljujući mrežnom priključku kuća će u tom nepovoljnom slučaju biti napajana električnom energijom iz elektroenergetske mreže. Mrežni se priključak u ovakvoj vrsti sustava smatra kao svojevrsni „back-up“. Ekološki bi najbolja situacija bila pri napajanju iz mreže ta da je energija koja dolazi iz mrežnog priključka proizvedena iz obnovljivih izvora energije. Tada bi on-grid sustav bio ekološki prihvatljiviji od off-grida pošto ne bi bilo emisije CO<sub>2</sub> od proizvodnje pa sve do potrošnje električne energije koju to kućanstvo koristi. Također, mrežni priključak nema ograničenja poput potrošnje goriva kao što je to slučaj kod dizelskog generatora jer solarna elektrana može biti isključena dok ponovno ne svane sunce ili vjetroelektrana dok opet ne zapuše vjetar, ali električne će energije u kući zahvaljujući elektroenergetskoj mreži neprestano biti. Ova vrsta sustava stoga dozvoljava minimalne pogreške pri procjeni uvjeta kod dizajniranja hibridnog energetskog sustava kuće, ali kod off-grid sustava ovaj bi prethodno navedeni slučaj mogao napraviti velike probleme.



*Slika 3.2. Prikaz strukture on-grid sustava [7]*

## 4. KUĆNI HIBRIDNI PV-BESS ENERGETSKI SUSTAV

Hibridni PV-BESS energetski sustav je vrsta hibridnog energetskog sustava koji se sastoji od solarne elektrane, baterijskog sustava te mrežnog priključka, dok kratica PV-BESS, odnosno „Photovoltaic - Battery Energy Storage System“, dolazi iz engleskog jezika te se većinom u tom obliku koristi u tehničkoj komunikaciji. Ova je vrsta hibridnih sustava najčešće korištena u kućanstvima te će se u ovom radu obrađivati baš taj primjer iz svakodnevnog života. Pri ovakvoj vrsti projektiranja nužno je provesti analizu različitih vrsta podatka kao što su broj sunčanih sati, potrošnja kućanstva i sl. Međutim, postoji niz dostupnih programskih alata koji nam taj proces znatno olakšavaju kao što su PVGIS sustav za prikupljanje broja sunčanih sati za točno određenu lokaciju. Nadalje, postoje razni izračuni za potrebnu snagu solarne elektrane na temelju naše potrošnje unatrag godinu dana, geografskom položaju kućanstva, broju solarnih sati te nagibu krova uz mnoge razne sitnije čimbenike koji utječu na konačni rezultat. Po dobivenom rezultatu, projektira se potrebni izmjenjivač te baterijski sustav koji služe za prijenos i distribuciju dobivene energije koja će se upotrijebiti pri opskrbi trošila kad to bude potrebno. PV\*SOL je programski alat koji nam omogućuje 3D vizualizaciju kućanstva te eksperimentalno virtualno postavljanje solarne elektrane na krov tog kućanstva i provedbu niza simulacija koje naposljetku rezultiraju grafovima proizvodnje, potrošnje, razmjene dobivene energije i sl. [8] [9]

Ovaj će završni rad kao primjer ugradnje hibridnog PV-BESS sustava uzeti kućanstvo u Istarskoj županiji stambene površine 180 m<sup>2</sup> te mrežnog priključka snage 7,36 kW.

### 4.1. Godišnja potrošnja kućanstva

Ovo je prvi korak u projektiranju sustava te se temelji na prikupljanju podataka vezanih uz potrošnju kućanstva unatrag godinu dana. Potrošnja je uzorkovana vremenskim intervalom od 15 minuta. Potrošnja se kao što znamo mjeri brojilom, ali nije moguće od bilo kojeg brojila izvući 15-minutnu krivulju potrošnje. To je moguće jedino u slučaju priključka s digitalnim brojilom pošto analogna brojila nemaju mogućnost mjerenja potrošnje za tako kratke vremenske intervale. Sljedeći će se izračuni temeljiti na podacima o potrošnji električne energije u gore navedenom kućanstvu prikupljenima putem digitalnog pametnog brojila Iskraemeco tipa Mx382.



#### 4.1.1. Digitalno pametno brojilo Iskraemeco-Mx382

Iskraemeco-Mx382 je digitalno pametno brojilo koje se upotrebljava za jednofazne i višefazne sustave. Temelji se na komunikaciji putem GSM/GPRS/UMTS protokola. GPRS je skraćenica koja dolazi iz engleskog jezika od riječi General Packet Radio Service. To je protokol koji je nadovezan na već postojeću GSM mrežu, tj. standardnu digitalnu mobilnu mrežu koja je primjenu našla u bežičnoj telefoniji. GPRS je svojim nastankom omogućio bržu uspostavu veze te povećao sigurnost pri prijenosu podataka. Također, ovaj je protokol bio ključan pri uspostavi 3G mreža. Telemetrija je vrlo važan proces bez kojeg bi prethodno navedeni protokol bio neupotrebljiv u našem slučaju. Može se definirati kao prijenos izmjerenih fizikalnih veličina u centralnu bazu iz koje je omogućeno daljinsko praćenje te upravljanje procesima. GSM mreža je zamijenjena tako UMTS mrežom koja koristi WCDMA tehnologiju koja joj omogućuje više prijenosne brzine, povećanu pohranu podataka te bolju kvalitetu komunikacije u odnosu na GSM mrežu. Zaslugom ovih protokola, prethodno se navedeno brojilo može koristiti u mnogo više slučajeva u odnosu na zastarjele tipove brojila. Daljinsko upravljanje, upravljanje s većim brojem energenata, sigurnosna komunikacija zahvaljujući enkripciji i protokolima prethodno opisanim, projektiranje solarnih elektrana te mjerenje potrošene energije iz mreže odnosno vraćene energije u mrežu neke su od mogućnosti koje ovaj tip brojila nudi. [10] [11]



Slika 4.1.1. Prikaz digitalnog pametnog brojila Iskraemeco-Mx38 [10]

#### 4.1.2. Krivulja potrošnje električne energije u kućanstvu

Podatci o 15-minutnoj potrošnji kućanstva mogu se na zahtjev dobiti od distributera električne energije, tj. HEP – ODS-a. Obično su ti podatci pohranjeni u obliku proračunskih tablica programskog alata Microsoft Excel. Potrebno je napraviti nekoliko kraćih matematičkih modulacija kako bi se mogla dobiti potrošnja unutar vremenskog intervala od petnaest minuta pošto nam 1. siječnja tekuće godine ne kreće mjerenje od 0 kWh, već od, primjerice, 5340 kWh.

14.5.2024. 6:36:45

**Results Report**

Measurement Point: 1101332597\_72480361  
Result Type: LP: A+\_T0  
Date range : 1.1.2023. 0:00:00 - 1.1.2024. 0:00:00

**Results Summary**

Raw Results: 35039 Modified Results: 0 Missing Results: 2

Result Status	Count
PowerDown	4

**Results**

Time Stamp	Value [kWh]	Status
1.1.2023. 0:00:00	7338,615000	0
1.1.2023. 0:15:00	7338,815000	0,2
1.1.2023. 0:30:00	7338,920000	0,105
1.1.2023. 0:45:00	7339,067000	0,147
1.1.2023. 1:00:00	7339,176000	0,109
1.1.2023. 1:15:00	7339,410000	0,234
1.1.2023. 1:30:00	7339,571000	0,161
1.1.2023. 1:45:00	7339,719000	0,148
1.1.2023. 2:00:00	7339,799000	0,08
1.1.2023. 2:15:00	7339,865000	0,066
1.1.2023. 2:30:00	7339,898000	0,033
1.1.2023. 2:45:00	7339,926000	0,028
1.1.2023. 3:00:00	7339,947000	0,021
1.1.2023. 3:15:00	7339,968000	0,021
1.1.2023. 3:30:00	7339,995000	0,027
1.1.2023. 3:45:00	7340,018000	0,023
1.1.2023. 4:00:00	7340,037000	0,019
1.1.2023. 4:15:00	7340,058000	0,021
1.1.2023. 4:30:00	7340,076000	0,018

ResultsViewerTabPageReport\_Repo Mjesečna potrošnja List3 +

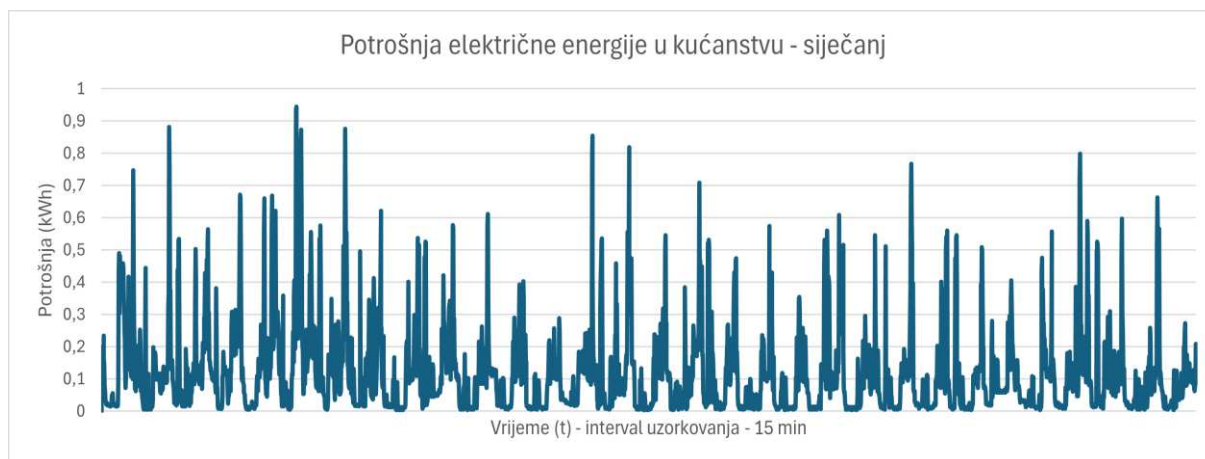
Slika 4.1.2. Prikaz proračunske tablice s podacima o potrošnji s 15-minutnim vremenskim intervalom očitavanja HEP-ODS-a

Upotrebom Excel-ove funkcije SUM i odabirom ćelija koje prikazuju potrošnju cijelog mjeseca dobijemo ukupnu mjesečnu potrošnju, a pri odabiru funkcije AVERAGE i istih tih ćelija s podacima o potrošnji, dobijemo prosječnu mjesečnu potrošnju. Godišnju ćemo mjesečnu potrošnju električne energije dobiti ukoliko zbrojimo sve mjesečne potrošnje prethodno izračunate.

	A	B	C	D	E
1			kWh		
2	<b>POTROŠNJA</b>	<b>siječanj</b>	<b>346,81</b>		
3		<b>veljača</b>	<b>265,59</b>		
4		<b>ožujak</b>	<b>285,23</b>		
5		<b>travanj</b>	<b>299,08</b>		
6		<b>svibanj</b>	<b>287,93</b>		
7		<b>lipanj</b>	<b>352,00</b>		
8		<b>srpanj</b>	<b>534,20</b>		
9		<b>kolovoz</b>	<b>691,87</b>		
10		<b>rujan</b>	<b>381,45</b>		
11		<b>listopad</b>	<b>320,67</b>		
12		<b>studenj</b>	<b>317,74</b>		
13		<b>prosinac</b>	<b>261,33</b>		
14					
15			<b>GODIŠNJA POTROŠNJA</b>	<b>4343,89 kWh</b>	
16					
17					

Slika 4.1.3 Prikaz proračunske tablice s mjesečnom i godišnjom potrošnjom

Nakon prikupljenih podataka, najbitnija je za projektiranje hibridnog sustava krivulja mjesečne potrošnje prema kojoj se točno mogu vidjeti ekstremi, tj minimalna i maksimalna potrošnja te prosjek tijekom cijelog mjeseca pa se sukladno tome može odlučiti kolika bi trebala biti snaga solarne elektrane, izmjenjivača te baterije našeg sustava.

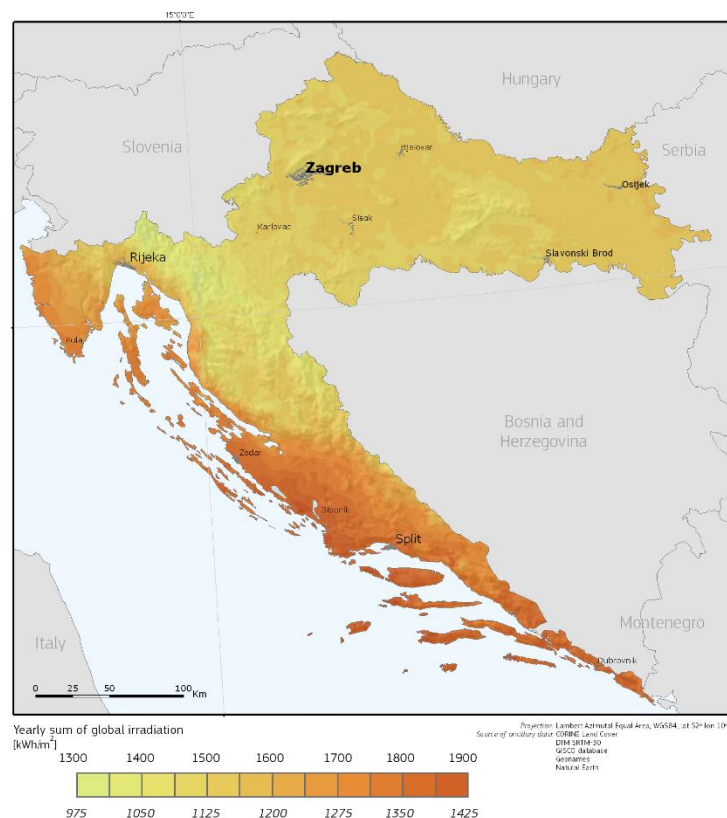


Slika 4.1.4. Prikaz krivulje potrošnje za siječanj s 15-minutnim intervalom uzorkovanja

## 4.2. Analiza sunčanih sati

Vrijeme izloženosti sunčanim satima također je vrlo važan kriterij pri projektiranju solarne elektrane jer ne bi imalo smisla projektirati solarnu elektranu u, primjerice, Finskoj gdje je prisutna pojava polarne noći što znači da ondje noć traje neprekidno čak nekoliko tjedana. Hrvatska ima, po tome pitanju, vrlo zahvalan geografski položaj pošto imamo znatno veći prosjek sunčanih sati od ostalih zemalja EU i svijeta. Zanimljiva je činjenica kako je hrvatski otok Hvar jedna od najsunčanijih lokacija u cijeloj Europi s čak više od 2700 sunčanih sati godišnje. [12]

Pozicioniranje solarne elektrane upravo na taj otok bio bi zasigurno pun pogodak te bi se početna investicija svakako isplatila. Također, živimo u svijetu izrazito napredne tehnologije što nam omogućuje mogućnost izračuna sunčanih sati za točno željenu lokaciju pomoću jedinstvenog sustava PVGIS. „Photovoltaic Geographic Information System“, odnosno PVGIS je sustav koji nam pruža informacije o solarnoj iradijaciji i isplativosti solarne elektrane točno određene veličine koju unesemo u obrazac koji nam je ponuđen u okviru tog sustava. Moguće je napraviti izračun te prikupiti podatke za bilo koju lokaciju osim za sjeverni i južni pol. [13]



Slika 4.2.1. Prikaz godišnje solarne iradijacije uz optimalan kut upada sunčevih zraka [13]

### 4.3. Solarna elektrana hibridnog energetskog sustava

Nakon obrade podataka o potrošnji kućanstva te istraživanja o sunčanim satima, pristupa se izračunu snage solarne elektrane hibridnog sustava. Solarni modul koji će biti korišten za solarnu elektranu je polikristalni silicijski standardni modul SV60-260 vršne snage 260W proizveden u varaždinskoj tvrtki SOLVIS d.o.o. koja je najveći proizvođač solarnih modula u Republici Hrvatskoj. [14]

U sustavu će biti instaliran i izmjenjivač tipa SUN 2000-3KTL-M1 (400Vac) ukupne snage 3 kW kojega proizvodi kompanija Huawei Technologies.

#### 4.3.1. Izračun snage

Snaga solarne elektrane koju je potrebno ugraditi ovisi o godišnjoj potrošnji kućanstva, solarnoj iradijaciji i stupnju učinkovitosti solarnih modula i to možemo opisati dolje navedenim izrazom (4.1). [3]

$$P_n [kWp] = \frac{W_{god} [kWh]}{H_{\beta opt} \left[ \frac{kWh}{m^2} \right] \cdot \eta} \quad (4.1)$$

$P_n$  – vršna snaga solarne elektrane

$W_{god}$  – godišnja potrošnja

$H_{\beta opt}$  – godišnja solarne iradijacija pod optimalnim kutom

$\eta$  – učinkovitost solarnog modula

Godišnja potrošnja je izračunata ranije kao zbroj svih mjesečnih potrošnji te iznosi 4343,89 kWh, dok godišnja solarne iradijacija na panele pod optimalnim kutom na zadanoj lokaciji u Istarskoj županiji iznosi 1741,6 kWh/m<sup>2</sup>. prema PVGIS sustavu. Učinkovitost panela je 86,8%, ali se također smanji zbog kuta upada sunčevih zraka i različite temperature tijekom cijele godine pa tu otpada, prema PVGIS sustavu, još 11,91%. Oduzimanjem tih dviju vrijednosti dođemo do konačne učinkovitosti od 74,79%. Uvrštavanjem ovih vrijednosti u

jednadžbu dobijemo vrijednost vršne snage solarne elektrane od 3,33 kWp. Pošto je nemoguće solarnim modulima snage 0,26 kW dobiti ovu vrijednost njihovim zbrajanjem, aproksimirat ćemo dobiveni rezultat prvim sljedećim višekratnikom broja 0,26 te ćemo tako odabrati 3,38 kWp kao vršnu snagu naše elektrane što je prikazano izrazom (4.2). [3]

$$P_n = \frac{4343,89 \text{ kWh}}{1741,6 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \cdot 0,7479} = 3,33 \approx 3,38 \text{ kWp} \quad (4.2)$$

Broj solarnih modula koji će nam biti potrebni za projekt dobit ćemo jednostavnom matematičkom formulom u kojoj ćemo podijeliti vršnu snagu solarne elektrane sa snagom jednog solarnog modula što prikazuje izraz (4.3). [3]

$$N_{MODULA} = \frac{P_n [\text{kWp}]}{P_{MODULA} [\text{kWp}]} = \frac{3,38}{260 \cdot 10^{-3}} = 13 \quad (4.3)$$

$N_{MODULA}$  – broj solarnih modula

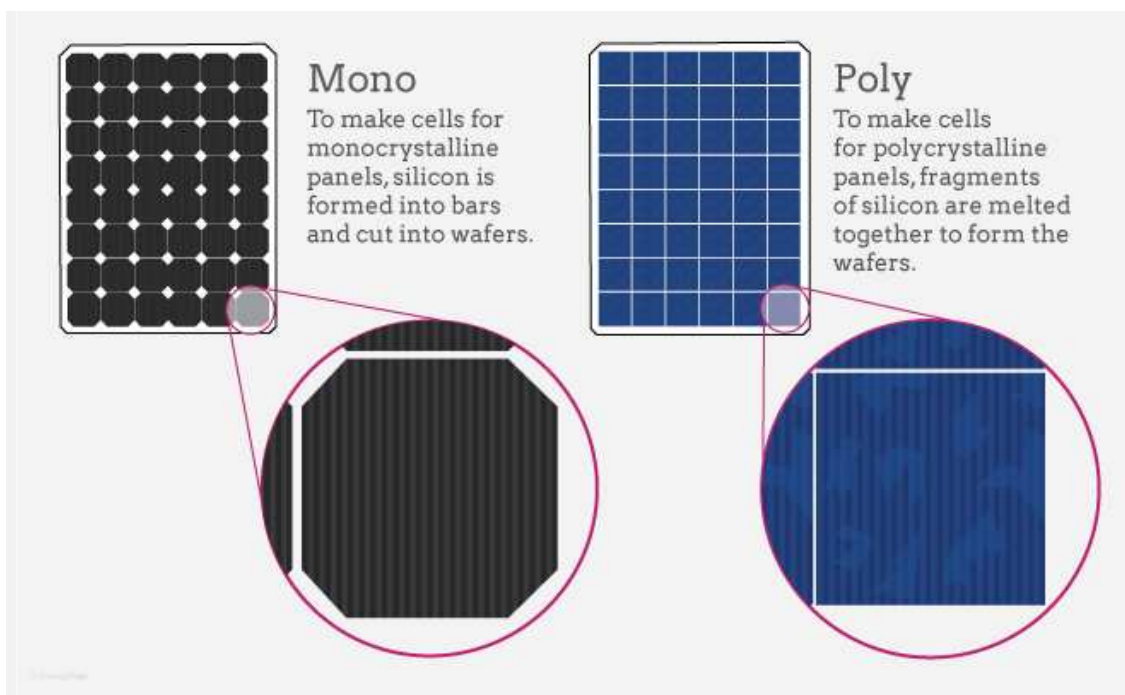
$P_n$  – vršna snaga elektrane

$P_{MODULA}$  – snaga jednog solarnog modula

Zaključujemo kako će za izvedbu naše solarne elektrane biti potrebno 13 solarnih modula.

#### 4.3.2. Polikristalni silicijski solarni moduli

Polikristalni silicijski solarni moduli su, uz monokristalne, najzastupljeniji u proizvodnji električne energije iz energije sunca. Razlikuju se po strukturi kristalne rešetke. Monokristalni solarni moduli napravljeni su od jednog jedinog kristala silicija, dok su polikristalni moduli dobiveni povezivanjem mnoštva monokristala silicija u jednu kompaktnu cjelinu. Veći broj kristala u strukturi polikristalnih silicijskih modula smanjuje slobodu kretanja elektrona što rezultira slabijom učinkovitosti ove vrste modula u odnosu na monokristalne. Suprotno tome, prednost polikristalnih silicijskih solarnih modula je njihova niska cijena stoga su relativno dobro zastupljeni na tržištu. Također, uočljiva je razlika i u boji solarnih modula ove dvije vrste pa će monokristalni moduli biti crne boje, dok će polikristalni biti plavi. [15]



*Slika 4.3.1. Prikaz monokristalne i polikristalne silicijske strukture solarnih modula [16]*

#### 4.3.3. Izmjenjivač

Izmjenjivač je vrlo bitan element solarne elektrane pošto pretvara istosmjernu struju koja dolazi iz solarnih modula u izmjeničnu struju koja se koristi u kućanstvu za napajanje trošila. Snaga izmjenjivača se računa uzimajući u obzir mnogo čimbenika kao što su snaga svakog trošila u kućanstvu uz dodani sigurnosni faktor koji iznosi do otprilike 20% snage solarne elektrane kako bi izmjenjivač u slučajevima nepredviđeno velikog opterećenja mogao savladati taj nepredviđeni teret. [17]

Primjerice, bušilica od 1kW je izrazito velik potrošač električne energije. Ukoliko obavljamo neke radove u kućanstvu i spojimo bušilicu u sustav, pri pokretanju bušilice dolazi do otprilike dvostruko veće vršne snage bušilice koja se kroz nekoliko sekundi vrati natrag na snagu od 1 kW. Naš izmjenjivač mora moći podnijeti tu snagu stoga projektiramo izmjenjivač uzimajući u obzir te neočekivane slučajeve povećanog tereta zajedno sa stalno priključenim potrošačima kao što su hladnjak, zamrzivač, televizor i sl. Neka zbroj tih naših stalnih trošila bude 0,7 kW, a uzimajući u obzir slučaj priključenja bušilice radne snage 1kW koja pri pokretanju naraste na 1,5 kW te uz sigurnosni faktor od, primjerice, 15% dolazimo do snage izmjenjivača koji ćemo ugraditi u naš sustav prikazanu izrazom (4.4). [17]

$$P_{kućanstvo} = 1,75P_{pvt} + P_{st} = 1,75 + 0,7 = 2,45 \text{ kW}$$

$$P_{izmjenjivač} = \frac{P_{kućanstvo} [\text{kW}]}{1 - \text{faktor sigurnosti}} = \frac{2,45}{0,85} = 2,88 \approx 3 \text{ kW} \quad (4.4)$$

$P_{kućanstvo}$  – ukupna snaga svih spojenih trošila u kućanstvu

$P_{pvt}$  – vršna snaga prilikom pokretanja pojedinog uređaja veće radne snage ( $\sim 1 \text{ kW}$ )

$P_{st}$  – ukupna snaga svih stalnih trošila u kućanstvu

$P_{izmjenjivač}$  – nazivna snaga izmjenjivača

Dobili smo rezultat 2,88 kW za nazivnu snagu izmjenjivača, ali pošto nema izvedbi izmjenjivača s tom snagom, aproksimirat ćemo vrijednost na najbližu cijelu vrijednost broja pa ćemo odabrati izmjenjivač nazivne snage 3 kW.

#### 4.3.4. Huawei SUN2000-3KTL-M1 solarni izmjenjivač

Trofazni solarni izmjenjivač SUN2000-3KTL-M1 solarni izmjenjivač proizvođača Huawei Technologies bit će korišten u ovom sustavu. Izmjenjivač ima maksimalnu učinkovitost od čak 98,6%. Ima ugrađeno baterijsko sučelje što osigurava lakše povezivanje s baterijom našeg hibridnog sustava. Izmjenjivač ima mogućnost povezivanja s aplikacijom FusionSolar koja je dostupna za preuzimanje putem pametnih telefona i računala. Aplikacija omogućuje daljinsko praćenje sustava. Moguće je očitati stanje proizvodnje, razmjene i potrošnje sustava u točnom trenutku. Također, dostupna je i statistička analiza potrošnje energije dobivene iz obnovljivih izvora, pohrana iste u bateriju ili slanje u mrežu. Korisničko sučelje je pregledno osmišljeno pa je omogućeno vrlo lagano rukovanje aplikacijom bez potrebe za ikakvim prethodnim iskustvom. [18] [19]





Slika 4.3.2. Prikaz Huawei SUN2000-3KTL-M1 trofaznog solarnog izmjenjivača [18]



Slika 4.3.3. Prikaz korisničkog sučelja FusionSolar mobilne aplikacije [19]

#### 4.4. Baterijski sustav hibridnog energetskeg sustava

Baterijski sustav jedan je od tri najvažnija dijela ovog hibridnog PV-BESS sustava. Pošto tijekom noći nema proizvodnje kod solarnih elektrana, potrebno je skladištiti energiju koja nije iskorištena tijekom dana kako bi se trošila tijekom noćnih sati napajala iz baterijskog sustava. Kako bi mogli procijeniti kapacitet baterije koji nam je potreban za naš sustav, moramo napraviti analizu potrošnje tijekom noćnih sati u kućanstvu. Potrošnja tijekom noći računa se pomoću proračunskih tablica koje su opisane ranije u radu te se uzima godišnja prosječna vrijednost noćne potrošnje koja je osnova za računanje potrebnog kapaciteta. Moramo uzeti u obzir da noć ne traje jednako tijekom svih godišnjih doba. Analizirat ćemo po jednu noć iz svakog godišnjeg doba nasumično odabranu te izračunati aritmetičku sredinu koja će odgovarati kapacitetu baterije koju želimo ugraditi u sustav. Pri izračunu moramo

uzeti u obzir i faktor učinkovitosti te vijek trajanja baterije koji uz ostale čimbenike utječu na naš krajnji rezultat.

Uzimamo podatke o ukupnoj potrošnji za noći s 20. na 21. siječnja, s 20. na 21. travnja, s 21. na 22. srpnja te s 4. na 5. listopada. Rezultati koje smo dobili prikazani su u Tablici 4.4.

*Tablica 4.4. Izračun prosječne noćne potrošnje kroz 4 godišnja doba*

Noćna potrošnja kroz 4 godišnja doba za nasumično odabrane dane				
Zalazak sunca	16:55 20.01.2023.	19:56 20.04.2023	20:43 21.07.2023	18:40 4.10.2023.
Izlazak sunca	07:35 21.01.2023.	06:11 21.04.2023.	05:39 22.07.2023	07:07 5.10.2023.
Potrošnja (kWh)	5,041	2,907	5,656	3,785
<b>PROSJEČNA NOĆNA POTROŠNJA (kWh)</b>			<b>4,34725</b>	

Dobiven je rezultat od 4,34725 kWh prosječne noćne potrošnje tijekom 4 različita godišnja doba. Međutim, kako bi očuvali bateriju i omogućili što duži vijek njezinog trajanja, preporučljivo je pražnjenje do otprilike 90% baterije. Kapacitet baterije dobit ćemo količnikom prosječne noćne potrošnje s maksimalnim pražnjenjem baterije uzimajući u obzir i gubitke tijekom punjenja i pražnjenja od otprilike 1-2% što je prikazano izrazom (4.5). [20]

$$\begin{aligned}
 \text{KAPACITET BATERIJE} &= \frac{\text{PROSJEČNA NOĆNA POTROŠNJA}}{\text{MAKSIMALNO PRAŽNJENJE} \cdot (1 - \text{GUBITCI})} \quad (4.5) \\
 &= \frac{4,34725}{0,9 \cdot (1 - 0,015)} = 4,9 \text{ kWh} \approx 5 \text{ kWh}
 \end{aligned}$$

Također, kao i kod ostalih izračuna, aproksimirat ćemo vrijednost na 5 kWh zbog većeg broja dostupnih baterija upravo tog kapaciteta.

Baterijski sustav koji ćemo ugraditi u kućanstvo bit će sadržan od SMA baterijskog izmjenjivača Sunny Island 4.4.M i Akasol neoQube baterije kapaciteta 5kWh.



*Slika 4.4.1. Prikaz baterijskog SMA izmjenjivača (lijevo) i Akasol neoQube baterije (desno) [21]*

#### **4.5. Programski alat PV\*SOL**

PV\*SOL je programski alat njemačke tvrtke Valentin Software koji omogućuje simulacije i dizajn u projektiranju solarnih elektrana, hibridnih PV – BESS sustava i sustava s dizalicama topline. Program omogućuje trodimenzionalnu vizualizaciju te postavljanje parametara solarnih modula, izmjenjivača i baterijskog sustava što nam omogućuje lakše projektiranje našeg sustava.

Projektiranje u programu PV\*SOL sastoji se od nekoliko glavnih koraka, a to su:

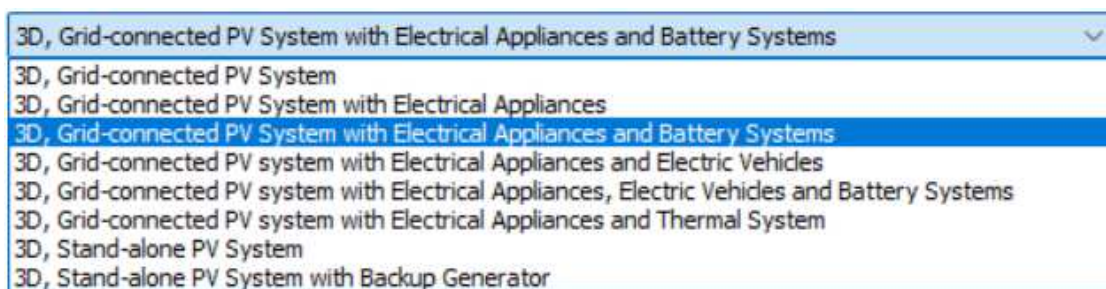
- 1) Vrsta energetskog sustava, klimatski podatci i mrežni priključak
- 2) Potrošnja

- 3) 3D dizajn
- 4) Baterijski sustav
- 5) Ožičenje
- 6) Shema i lista dijelova
- 7) Financijska analiza
- 8) Rezultati
- 9) Prezentacija

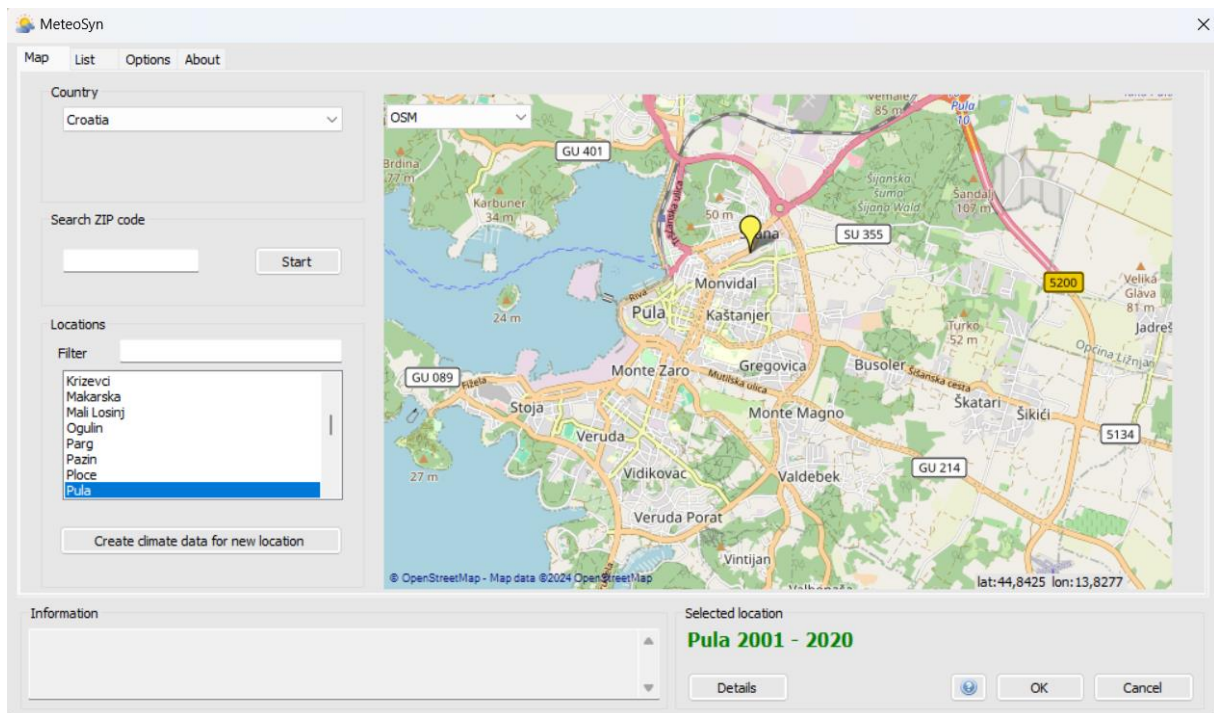
Svi su ovi koraci jednako važni pri projektiranju jer se jedino sintezom svakog od tih elemenata može stvoriti potpuna slika projekta i sukladno njoj donositi zaključke vezane za projekt.

#### 4.5.1. Vrsta energetskeg sustava, klimatski podatci i mrežni priključak

U ovom su koraku projektiranja u programu PV\*SOL ponuđene različite vrste energetskeg sustava, ali pošto je zadatak projektirati hibridni energetskeg sustav sa solarnom elektranom, baterijom i mrežnim priključkom, u padajućem izborniku odabiremo „3D, Grid-connected PV System with Electrical Appliances and Battery Systems“. Nadalje, upisujemo u obrazac koji nam omogućuje dohvat podataka o sunčanim satima lokaciju za koju projektiramo sustav. Naposljetku upisujemo parametre mrežnog priključka tako što biramo broj faza te fazni napon elektroenergetske mreže na koju planiramo spojiti naš hibridni sustav.



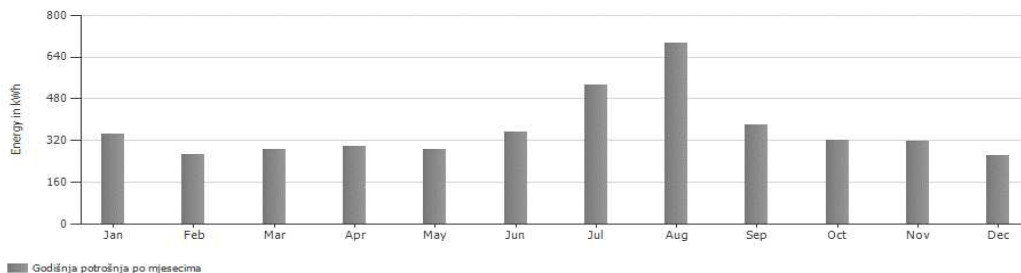
*Slika 4.5.1. Prikaz vrsti energetskeg sustava u programu PV\*SOL*



Slika 4.5.2. Prikaz odabira lokacije na kojoj će hibridni sustav biti smješten

#### 4.5.2. Potrošnja

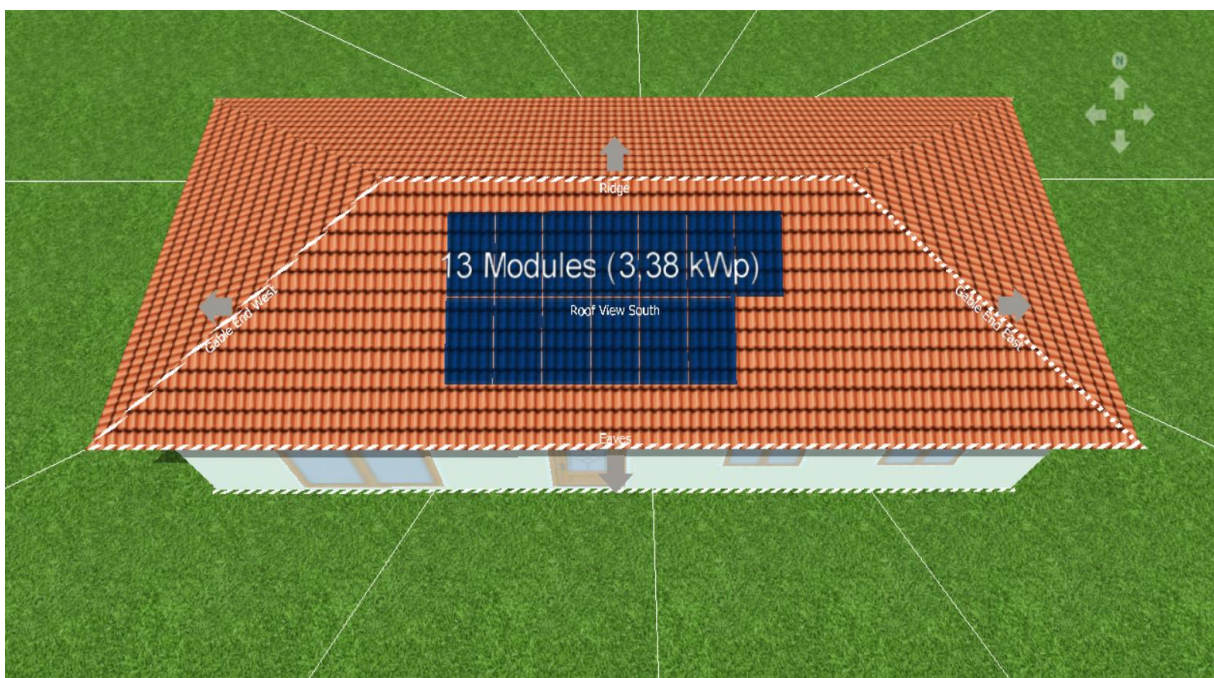
Ovaj dio PV\*SOL programskog alata omogućuje zapis podataka o potrošnji koji smo prethodno izračunali putem proračunskih tablica primjenom jednostavnih računskih funkcija. Pruža se i mogućnost prikaza spojenih trošila u mrežu pa se tako aproksimira i podatak o maksimalnom dnevnom prosječnom teretu priključenom u mrežu. Očekivano dobivamo veći prosječni teret tijekom ljetnih mjeseci u odnosu na zimske zbog povećane potrošnje u kućanstvu. Većinom su najveći ljetni potrošači energije klima uređaji pošto su to električni uređaji znatno veće snage u odnosu na ostale.



Slika 4.5.3 Prikaz godišnje potrošnje po mjesecima pomoću PV\*SOL programa

#### 4.5.3. 3D dizajn

Treći korak izrade projekta hibridnog energetskog sustava u PV\*SOL programu je 3D dizajn. Ovdje nailazimo na mogućnost trodimenzionalne vizualizacije našeg projekta. Počinjemo s odabirom točnog oblika objekta, gdje su nam ponuđene kuće s različitim oblicima krovova. Po odabiru kuće s željenim krovom, moramo razmotriti dimenzije kuće te njezin geografski položaj. Kuća je okrenuta u potpunosti prema jugu što je i najpovoljnija situacija pri proizvodnji električne energije pomoću solarne elektrane. Kut nagiba krova nikako ne smijemo zapostaviti pošto proizvodnja ovisi i o kutu upada sunčevih zraka na solarne module pa uzimamo za nagib krova kut od 25°. Solarne module postavljamo na krov na temelju prethodno napravljenog izračuna. Postavit ćemo 13 modula u dva reda tako što će u gornjem redu biti 7, a u donjem redu 6 povezanih solarnih modula. Ukupna će instalirana snaga svakako iznositi 3,38 kWp kao što je i predviđeno.

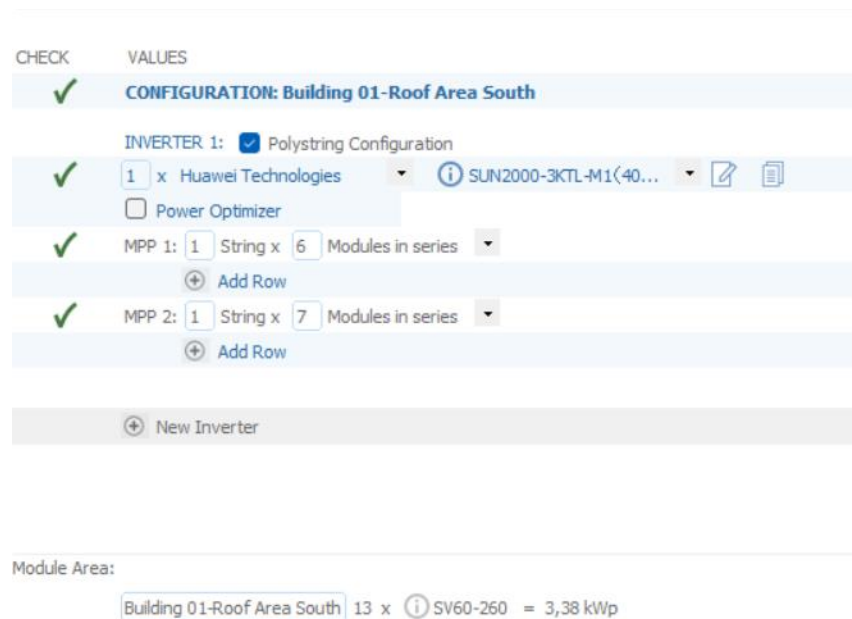


*Slika 4.5.4. Prikaz postavljenih solarnih modula*

Solarni moduli spojeni zajedno u jednom redu su povezani u seriju te tako čine jednu cjelinu koja se u tehničkom svijetu naziva „string“, tj. pletenica. Dakle, zaključujemo kako na krovu ove kuće imamo dva „stringa“. Međutim, ako se dogodi bilo koji problem kod jednog od modula povezanog u „string“, taj će se problem odraziti na cjelokupan „string“. Možemo

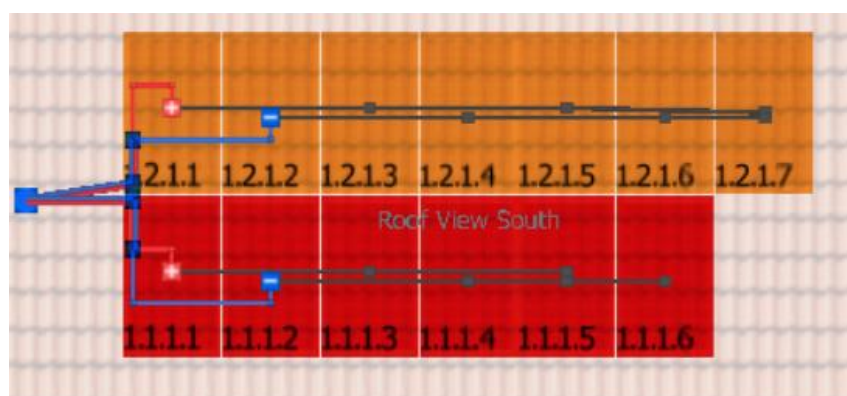
to poistovjetiti sa serijski spojenim žaruljama. Primjerice, imamo tri serijski spojene žarulje i ukoliko jedna od njih izgori, ostale dvije neće više svijetliti. [22]

Ova su nam dva „stringa“ bitna pri spajanju izmjenjivača. Izmjenjivač se za sustav bira u izborniku koji pruža mogućnost odabira raznih vrsta izmjenjivača. Po odabiru izmjenjivača snage 3kW koji smo odabrali putem prethodnog izračuna, biramo broj „stringova“ te broj modula po „stringu“ koji nam finalno trebaju dati zbroj od 3,38 kWp.



Slika 4.5.5. Prikaz konfiguracije izmjenjivača

Prethodno odabrani izmjenjivač moramo spojiti na način da zasebno spojimo svaki od dva „stringa“ s njim što nam prikazuje Slika 4.5.6.



Slika 4.5.6. Prikaz spajanja solarnih modula s izmjenjivačem










#### 4.5.4. Baterijski sustav

Baterijski se sustav ovog hibridnog energetskog sustava sastoji od baterijskog izmjenjivača te baterije. Baterijski izmjenjivač je uređaj koji pretvara istosmjernu struju pohranjenu u bateriji u izmjeničnu struju kako bi se mogla napajati trošila u kućanstvu. Baterijski izmjenjivači su od vrlo velike važnosti za naš sustav pošto omogućuju korištenje pohranjene energije iz baterije.

Baterija je projektirana temeljen prethodnog izračuna za skladištenje električne energije proizvedene u solarnoj elektrani. Kod hibridnih PV-BESS sustava najčešće se koriste tri vrste baterija za skladištenje energije a to su:

- 1) Olovne baterije
- 2) Litij-ionske baterije
- 3) Baterije na bazi slane vode

Olovne baterije su jeftine, ali je njihova upotreba smanjena zbog izrazito velike štetnosti za okoliš te visoke mogućnosti eksplozije. Litij-ionske baterije su najpopularniji tip baterija zbog njihove visoke gustoće energije, malih dimenzija, dugog vijeka trajanja te relativno zadovoljavajućeg kapaciteta pražnjenja (~80%). Baterije na bazi slane vode su tehnološki trend zbog niza prednosti kojima odlikuju. Nisu štetne za okoliš, imaju najveći stupanj sigurnosti i pružaju mogućnost pražnjenja od čak 100%. Međutim, nisu se našle u široj primjeni zbog njihovih izrazito velikih dimenzija koje su, ustvari, jedini nedostatak ove vrste. [23]

Battery	Cost	Lifespan	Depth of Discharge
Lead Acid			
Lithium			
Saltwater			

© EnergySage

Slika 4.5.7. Prikaz cijene, vijeka trajanja i kapaciteta pražnjenja za sve tri vrste baterija [24]

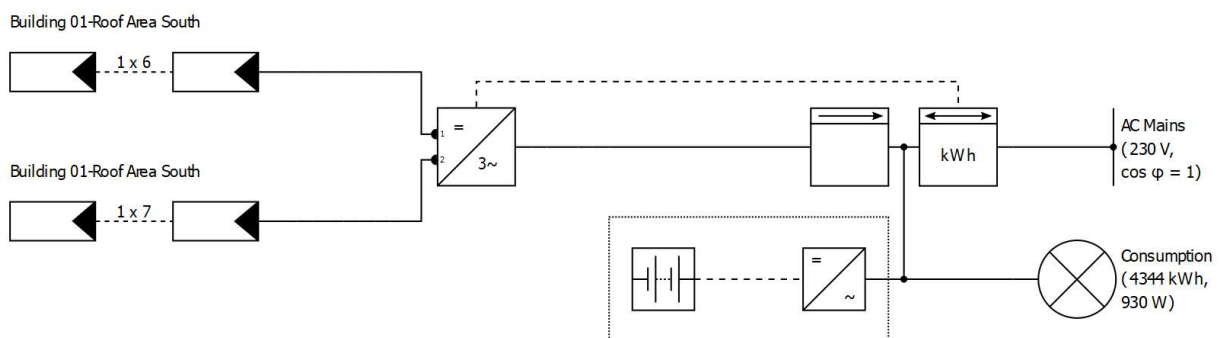


Baterija koja se koristi u ovom radu je specifična vrsta litij-ionskih baterija, tj. litij-niklov oksid (LNO) baterija. Ovaj tip baterije opisuje novu generaciju litij-ionskih baterija te pokazuje izrazito dobre performanse. [25]

Četvrti korak u programu PV\*SOL bit će odabir baterijskog izmjenjivača SMA Sunny Island 4.4.M te baterije Akasol neoQube 5,5 kWh koje smo za ovaj hibridni sustav prethodno odabrali pri izračunu kapaciteta baterije.

#### 4.5.5. Strujni krug hibridnog PV-BESS sustava

Strujni se krug ovog hibridnog sustava sastoji od solarne elektrane, izmjenjivača, brojila, baterijskog sustava, trošila te mrežnog priključka. Solarna se elektrana sastoji od dva „stringa“ koji su zasebno spojeni s izmjenjivačem. Proces pretvorbe koji se događa u izmjenjivaču je promjena istosmjerne struje koja dolazi iz solarne elektrane u trofaznu izmjeničnu struju koja dalje nastavlja teći strujnim krugom te dolazi do točke grananja. Ako se postavimo u točku grananja, desno od nje se nalazi mjerni priključak. Također, ondje se nalazi brojilo koje mjeri energiju koja je uzeta iz mreže za opskrbu trošila kućanstva ili koja je predana u mrežu iz našeg sustava. Ispod točke grananja, lijevo se nalazi baterijski sustav, a desno trošila kućanstva.



Slika 4.5.8. Prikaz strujnog kruga kućnog hibridnog PV-BESS sustava

## 4.6. Rezultati simulacije

Nakon prethodnih koraka koje smo opisali, zadnji, ali vjerojatno najbitniji od njih, koji nam potvrđuje točnost naših izračuna jest simulacija. Simulacijom dobijemo širu sliku o našem energetskom sustavu. Podatci dobiveni simulacijom tiču se proizvodnje, potrošnje te energetskih tokova u sustavu. Upravo nam ti podatci daju konačnu ocjenu našeg projekta te sukladno njima možemo promišljati o eventualnim modifikacijama sustava. Razmotrit ćemo podatke dobivene simulacijom za tri bitna čimbenika našeg sustava, a to su raspodjela električne energije proizvedene pomoću solarne elektrane, potrošnja električne energije u sustavu i tok električne energije baterijskog sustava.

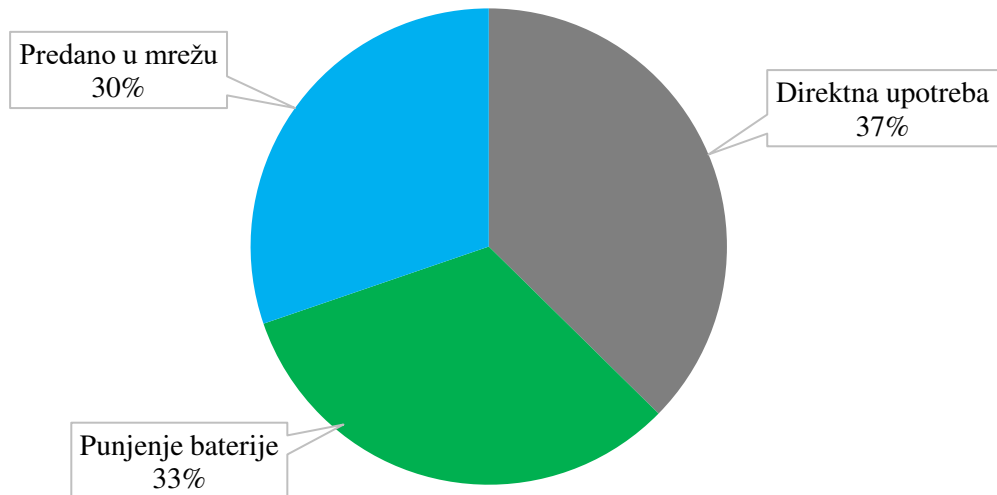
### 4.6.1. Podatci o godišnjoj proizvodnji solarne elektrane

Količina energije koju će solarna elektrana proizvesti očekuje se da će biti otprilike jednaka ukupnoj potrošnji kućanstva za koje je projektirana. Proizvedena energija će se u slučaju velikog tereta u sustavu odmah potrošiti. Nadalje, ako je proizvedena energija veća od potrošnje trošila, energija će se skladištiti u bateriju. Međutim, postoji i treći slučaj kad ima viška energije u sustavu, a baterija je napunjena. U tom će se slučaju višak energije predati u mrežu. Rezultati simulacije vezani uz tok električne energije u sustavu prikazani su u Tablici 4.6.1..

*Tablica 4.6.1. Raspodjela proizvedene električne energije*

Godišnji podatci o toku električne energije proizvedene pomoću solarne elektrane	
<b>Ukupna proizvedena električna energija</b>	<b>4549 kWh/godišnje</b>
Direktna upotreba energije	1700 kWh/godišnje
Energija skladištena u bateriji	1473 kWh/godišnje
Energija predana u mrežu	1376 kWh/godišnje

### Raspodjela proizvedene električne energije



Slika 4.6.1. Prikaz raspodjele proizvedene električne energije

#### 4.6.2. Podatci o godišnjoj potrošnji u sustavu

Ukupna potrošena električna energija ovog kućnog hibridnog PV-BESS sustava sastoji se od ukupne godišnje potrošnje električne energije u kućanstvu i potrošnje izmjenjivača u stanju pripravnosti. Izmjenjivač koristi otprilike 1% snage u stanju svoje pripravnosti što znači da se tijekom godine nakupi određena količina energije koju on potroši kada u sustavu nije priključen velik teret. Neki izmjenjivači mogu koristiti i način slabog napajanja koji je energetski učinkovitiji od prethodno spomenutog stanja pripravnosti. Tada izmjenjivač ne bi trošio toliko energije kad u sustavu nema tereta, već bi čekao signal koji bi označavao njegov početak rada. [26]

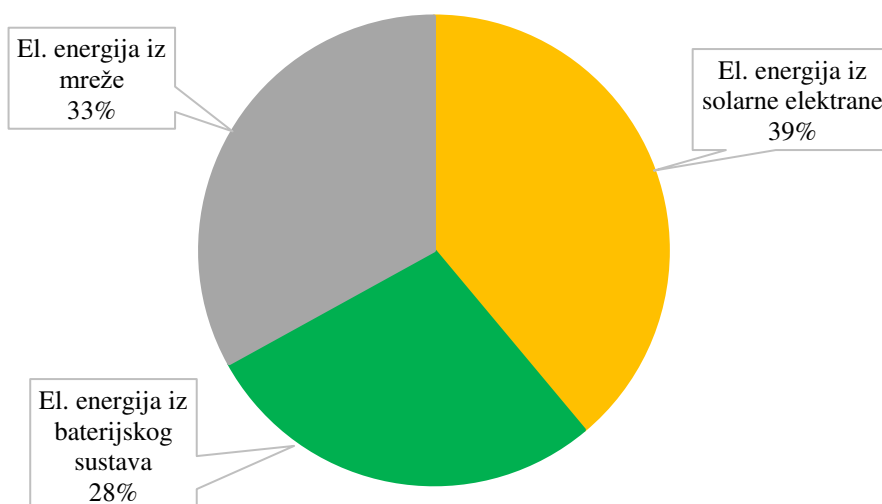
Nadalje, razmatraju se izvori iz kojih je sustav napajan električnom energijom. Prisutna su tri izvora opskrbe električnom energijom, a to su:

- 1) Električna energija proizvedena u kućnoj solarnoj elektrani
- 2) Električna energija skladištena u bateriji
- 3) Električna energija dobivena iz mreže

Tablica 4.6.2. Prikaz godišnje potrošnje električne energije u sustavu

<b>Godišnji podatci o potrošnji električne energije u sustavu</b>	
Potrošena električna energija u kućanstvu	4344 kWh/godišnje
Potrošnja izmjenjivača u stanju pripravnosti	24 kWh/godišnje
<b>Ukupna potrošena električna energija</b>	<b>4368 kWh/godišnje</b>
Potrošnja pokrivena el. energijom proizvedenom u kućnoj solarnoj elektrani	1700 kWh/godišnje
Potrošnja pokrivena el. energijom skladištenom u bateriji	1226 kWh/godišnje
Potrošnja pokrivena el. energijom dobivenom iz mreže	1442 kWh/godišnje

**Ukupna godišnja potrošena električna energija**



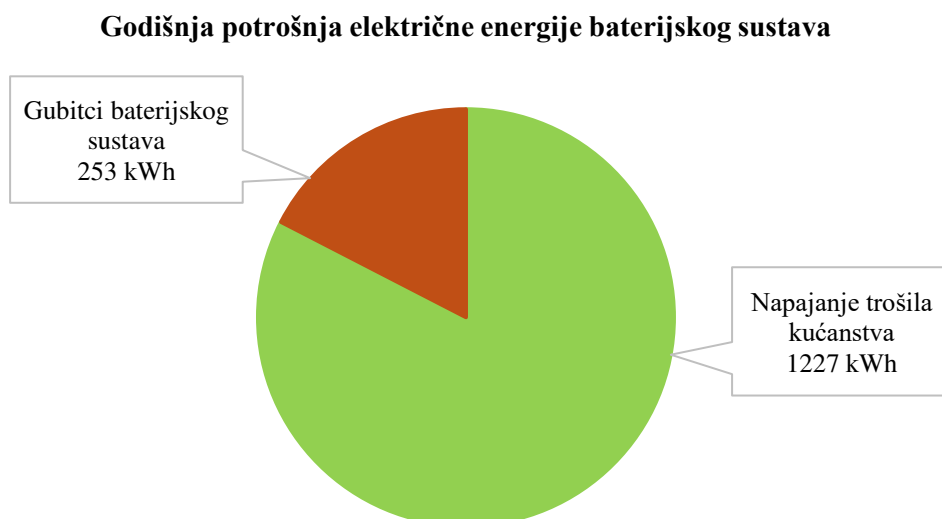
Slika 4.6.2. Prikaz ukupne godišnje potrošnje električne energije na temelju izvora napajanja električnom energijom

Iz ovog se grafikona može izračunati i stupanj autonomnosti našeg kućnog hibridnog PV-BESS sustava. Računski se to prikazuje sljedećim izrazom (4.6).

$$\begin{aligned} \text{stupanj autonomnosti} &= 100\% - (\text{udio energije dobivene iz mreže}) \quad (4.6) \\ &= 100 - 33\% = 67\% \end{aligned}$$

#### 4.6.3. Podatci o toku energije baterijskog sustava

Tok energije baterijskog sustava vrlo je važan u pohrani energije te kasnijoj opskrbi kućanstva tom akumuliranom energijom. Rezultati simulacije u program PV\*SOL pokazuju nam da je baterija na početku napunjena na svoj maksimalni kapacitet 5kWh. Baterija tijekom cijele godine pohrani 1474 kWh električne energije. Gotovo sva ta električna energija dolazi iz solarne elektrane, a samo 0,001%, tj. 1kWh energije baterija pohrani iz mreže. Baterija napaja sustav velikim dijelom pohranjene električne energije pa 1227 kWh godišnje troši za napajanje, ali kao i u svakom realnom sustavu očekuju se neki gubitci u procesu. Tako se godišnje 249 kWh električne energije troši na gubitke tijekom punjenja i pražnjenja baterije i 4kWh na gubitke unutar baterije. Vijek trajanja baterije prije smanjenja njezinih prvotnih performansi smanjio se također za 9,5%. Na sljedećem će grafikonu biti prikazana godišnja potrošnja električne energije baterijskog sustava.



Slika 4.6.3. Prikaz godišnje potrošnje električne energije baterijskog sustava

Temeljem grafikona možemo izračunati stupanj učinkovitosti baterijskog sustava. Stupanj učinkovitosti baterijskog sustava dobije se količnikom korisnog rada baterijskog sustava i ukupne potrošnje energije baterijskog sustava. U nastavku je prikazan izračun stupnja učinkovitosti (4.7).

$$\eta = \frac{\text{napajanje trošila kućanstva}}{\text{gubitci baterijskog sustava} + \text{napajanje trošila kućanstva}} \quad (4.7)$$

$$\eta = \frac{1227 \text{ kWh}}{253 \text{ kWh} + 1227 \text{ kWh}} = \frac{1227 \text{ kWh}}{1480 \text{ kWh}} = 0,829 = 82,9\%$$

Zaključujemo da je stupanj učinkovitosti baterijskog sustava ( $\eta$ ) jednak 82,9% što nam ukazuje da gubitci u sustavu ipak zauzimaju određeni udio u potrošnji električne energije baterijskog sustava.

Ovo je bio posljednji korak analize rezultata simulacije te su prikazani najbitniji podatci koji nam pokazuju učinkovitost, tj. isplativost projektiranog sustava. Rezultati dobiveni simulacijom su zadovoljavajući te se sukladno njima projektirani sustav može ugraditi u kućanstvo. Naravno, postoje razne modifikacije koje bi poboljšale konačnu učinkovitost sustava, ali bi tada sustav bio znatno skuplji i kompliciraniji za izvedbu.

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu isticala se važnost dekarbonizacije za očuvanje prirode i zdraviji život ljudi na Zemlji. Hibridni PV-BESS energetska sustava koji se sastoji od solarne elektrane, baterije te mrežnog priključka bio je sredstvo dekarbonizacije u ovom radu.

Detaljno su objašnjene izvedbe hibridnih energetska sustava koje su bile povezane s primjerima iz svakodnevnog života kako bi pobliže bile dočarane svakome tko čita ovaj rad, neovisno o njegovom prethodnom tehničkom znanju.

Sunce je energent koji je svakodnevno prisutan u našim životima, a mi većinom ne iskoristavamo njegovu „besplatnu“ energiju. Solarne elektrane kućanstva koja je dio hibridnog energetska sustava opisanog u ovom radu koristi upravo tu energiju za proizvodnju električne energije. Proizvedena električna energija iz sunčeve energije u ovom kućanstvu pokriva čak 67% ukupne godišnje potrošnje kućanstva, a da se pritom ne emitira ni gram ugljikovog dioksida. Dakle, dobijemo besplatnu električnu energiju u kućanstvu, a pritom vršimo dekarbonizaciju energetska sektora. Štoviše, kad bi baterija našeg sustava imala veći kapacitet, što ipak iziskuje znatno veći trošak pri ugradnji kućnog hibridnog energetska sustava, autonomnost sustava porasla bi na čak 98,5% pošto se zbog malog kapaciteta baterije dobar dio proizvedene energije šalje u mrežu. U tom bi slučaju svega 1,5% od godišnje potrošnje električne energije u kućanstvu otpalo na električnu energiju dovedenu iz mrežnog priključka. Vrlo je impresionirajuća činjenica da bi se godišnje u ovom kućanstvu potrošilo otprilike 10 eura električne energije zanemarujući fiksne troškove priključka koje plaćamo odabranom i ugovorenim opskrbljivaču električne energije. Ovaj podatak će mnoge ljude čak i nesvjesno natjerati na ekološku osviještenost jer ugradnjom ovakvih sustava u svoje domove provode dekarbonizaciju kroz hibridne energetske sustave što je i tema ovoga završnoga rada.

Isplativost ugradnje kućnih hibridnih energetska sustava dokazana je simulacijom. Glavni cilj ugradnje hibridnih energetska sustava je spasiti planet na kojem živimo. Čovječanstvo ima u rukama „život“ planeta na kojemu živimo, pogrešan potez smanjuje mu vijek trajanja, a pravilan produljuje. Stoga zaključujemo kako je na nama hoćemo li obraniti naš planet od klimatskih promjena ili ga uništiti nepovratno.

## 6. LITERATURA

- [1] Ministarstvo gospodarstva, Zaštita ozonskog omotača i klimatske promjene, preuzeto s: [https://mingo.gov.hr/UserDocsImages/NASLOVNE%20FOTOGRAFIJE%20I%20KORI%20%20TENI%20LOGOTIPOVI/doc/zastita\\_ozonskog\\_omotaca\\_i\\_klimatske\\_promjene\\_.pdf](https://mingo.gov.hr/UserDocsImages/NASLOVNE%20FOTOGRAFIJE%20I%20KORI%20%20TENI%20LOGOTIPOVI/doc/zastita_ozonskog_omotaca_i_klimatske_promjene_.pdf) (datum preuzimanja: 27.08.2024.)
- [2] The Guardian, 'Reality check': Global CO2 emissions shooting back to record levels, preuzeto s: <https://www.theguardian.com/environment/2021/nov/04/reality-check-global-co2-emissions-shooting-back-to-record-levels> (datum preuzimanja: 27.08.2024.)
- [3] Franki V., Višković A., predavanja i materijali iz kolegija Osnove elektroenergetike i održivog razvoja u akademskoj godini 2022./2023.
- [4] Vijeće Europske Unije, Pariški sporazum o klimatskim promjenama, preuzeto s: <https://www.consilium.europa.eu/hr/policies/climate-change/paris-agreement/> (datum preuzimanja 27.08.2024.)
- [5] Department of Electrical Engineering, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey, On-Grid and Off-Grid Hybrid Renewable Energy System Designs with HOMER: A Case Study of Rural Electrification in Turkey, preuzeto s: <https://avesis.cumhuriyet.edu.tr/yayin/698c7ca1-461b-4d78-a1cc-4686eca4ab92/on-grid-and-off-grid-hybrid-renewable-energy-system-designs-with-homer-a-case-study-of-rural-electrification-in-turkey> (datum preuzimanja: 27.08.2024.)
- [6] MDPI, Energy Management and Optimization of a PV/Diesel/Battery Hybrid Energy System Using a Combined Dispatch Strategy, preuzeto s: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/3/683> (datum preuzimanja: 27.08.2024.)
- [7] ResearchGate, Configuration of grid-connected hybrid renewable energy system, preuzeto s: [https://www.researchgate.net/figure/Configuration-of-grid-connected-hybrid-renewable-energy-system\\_fig1\\_316743161](https://www.researchgate.net/figure/Configuration-of-grid-connected-hybrid-renewable-energy-system_fig1_316743161) (datum preuzimanja: 27.08.2024.)
- [8] ScienceDirect, Journal of Energy Storage, A review on hybrid photovoltaic – Battery energy storage system: Current status, challenges, and future directions, preuzeto s: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X22006132> (datum preuzimanja: 28.08.2024.)



- [9] Research Group Solar and Wind Feasibility Technologies (SWIFT), Electromechanical Engineering Department, Universidad de Burgos, Spain, Engineering Department, Universidad Pública de Navarra, Photovoltaic Prediction Software: Evaluation with Real Dana from Northern Spain, preuzeto s: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/11/5025> (datum preuzimanja: 28.08.2024.)
- [10] Iskraemeco d.o.o., Smart Mx382 – Brojilo električne energije s GSM/GPRS/UMTS komunikatorom, preuzeto s: [https://www.iskraemeco.hr/Mx382\\_HRV.pdf](https://www.iskraemeco.hr/Mx382_HRV.pdf) (datum preuzimanja: 28.08.2024.)
- [11] Fističić M., Primjena GPRS i UMTS komunikacijskih tehnologija kod daljinskog nadzora i upravljanja vodoopskrbnim sustavima, preuzeto s: <https://www.ptmg.hr/media/radovi/Daljinski-nadzor-i-upravljanje-vodama.pdf> (datum preuzimanja: 28.08.2024.)
- [12] Turistička zajednica Općine Jelsa, „Jeste li znali da otok Hvar ima više od 2700 sunčanih sati godišnje?“, preuzeto s: <https://visitjelsa.hr/hr/4339/jeste-li-znali-da-otok-hvar-ima-vise-od-2700-suncanih-sati-godisnje/> (datum preuzimanja: 28.08.2024.)
- [13] Europska komisija, Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), preuzeto s: [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en) (datum preuzimanja: 28.08.2024.)
- [14] Solvis d.o.o., Varaždin, službena web-stranica tvrtke, brošura – Model SV60, preuzeto s: [https://solvis.hr/wp-content/uploads/2019/05/LQSOLVIS-DS-HR-SV60\\_5BB-1640x992x40-255-275-20190125.pdf](https://solvis.hr/wp-content/uploads/2019/05/LQSOLVIS-DS-HR-SV60_5BB-1640x992x40-255-275-20190125.pdf) (datum preuzimanja: 28.08.2024.)
- [15] Doc. dr. sc. Matej Fonović, predavanja iz kolegija Tehnologija materijala u akademskoj godini 2021./2022.
- [16] American Solar Energy Society, Monocrystalline vs Polycrystalline Solar Panels, preuzeto s: <https://ases.org/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels/> (datum preuzimanja: 29.08.2024.)
- [17] Dongguan TGpro New Energy Technology Co., „Will A 5000 Watt Inverter Run a House“, preuzeto s: <https://m.tgprobattery.com/info/will-a-5000-watt-inverter-run-a-house--89177037.html> (datum preuzimanja: 29.08.2024.)

- [18] MG-solar-shop, Huawei SUN2000-3KTL-M1 - Hybrid-Inverter, preuzeto s: <https://www.mg-solar-shop.com/huawei-sun2000-3ktl-m1-hybrid-inverter> (datum preuzimanja: 29.08.2024.)
- [19] Huawei Technologies Co., Ltd., Fusion Solar Residential Smart PV& ESS Solution, preuzeto s: <https://solar.huawei.com/en/professionals/residential> (datum preuzimanja: 29.08.2024.)
- [20] Shieldchannel.com, How Do You Calculate Solar Panel to Battery, preuzeto s: [https://www.shieldchannel.com/blogs/battery/how-do-you-calculate-solar-panel-to-battery?srsrtid=AfmBOor2F1ru56M4bm7sDWFrw3UgcZBOUZISqnuIUMtu\\_cRt5SeN-OFw](https://www.shieldchannel.com/blogs/battery/how-do-you-calculate-solar-panel-to-battery?srsrtid=AfmBOor2F1ru56M4bm7sDWFrw3UgcZBOUZISqnuIUMtu_cRt5SeN-OFw) (datum preuzimanja: 29.08.2024.)
- [21] Solarchoice.net.au, neoQube: A simple energy storage solution for homes, preuzeto s: <https://www.solarchoice.net.au/blog/akasol-neeoqube-neesystem-solar-energy-storage-solutions/> (datum preuzimanja: 30.08.2024.)
- [22] Solarno.net, „5 najčešćih grešaka kod gradnje solarnih elektrana u BiH“, preuzeto s: <https://solarno.net/5-najcesciah-gresaka-kod-gradnje-solarnih-elektrana-u-bih/> (datum preuzimanja: 30.08.2024.)
- [23] Greenrock, Sustav za skladištenje energije na bazi slane vode, preuzeto s: <https://novi-vinodolski.hr/wp-content/uploads/2022/05/Prezentacija-Greenrock-HR.pdf> (datum preuzimanja: 30.08.2024.)
- [24] Infinity Renewables Group, How to choose the best battery for a solar energy system, preuzeto s : <https://infinity-renewables.com/how-to-choose-the-best-battery-for-a-solar-energy-system/> (datum preuzimanja: 30.08.2024.)
- [25] Influx Big Data Solutions Pvt Ltd., Different chemistry of lithium-ion batteries (2022) preuzeto s: <https://www.influxbigdata.in/post/lithium-ion-battery-chemistry-types> (datum preuzimanja: 30.08.2024.)
- [26] PowMr.com, „How much power does an inverter use on standby?“ preuzeto s: <https://powmr.com/blogs/news/how-much-power-does-an-inverter-draw-with-no-load> (datum preuzimanja:30.08.2024.)

## 7. DODATCI

### Popis slika

Slika 2.1. Prikaz efekta staklenika [1] .....	2
Slika 2.2. Prikaz zagađenja zraka [2] .....	3
Slika 3.1. Prikaz strukture off-grid sustava [6] .....	6
Slika 3.2. Prikaz strukture on grid sustava [7] .....	8
Slika 4.1.1. Prikaz digitalnog pametnog brojila Iskraemeco-Mx38 [10] .....	10
Slika 4.1.2. Prikaz proračunske tablice s podacima o potrošnji s 15-minutnim vremenskim intervalom očitavanja HEP-ODS-a .....	11
Slika 4.1.3. Prikaz proračunske tablice s mjesečnom i godišnjom potrošnjom .....	12
Slika 4.1.4. Prikaz krivulje potrošnje za siječanj s 15-minutnim intervalom uzorkovanja .....	12
Slika 4.2.1. Prikaz godišnje solarne iradijacije uz optimalan kut upada sunčevih zraka [13] .	13
Slika 4.3.1. Prikaz monokristalne i polikristalne silicijske strukture solarnih modula [16] ....	16
Slika 4.3.2. Prikaz Huawei SUN2000-3KTL-M1 trofaznog solarnog izmjenjivača [18] .....	18
Slika 4.3.3. Prikaz korisničkog sučelja FusionSolar mobilne aplikacije [19] .....	18
Slika 4.4.1. Prikaz baterijskog SMA izmjenjivača (lijevo) i Akasol neoQube baterije (desno) [21] .....	20
Slika 4.5.1. Prikaz vrsti energetske sustava u programu PV*SOL .....	21
Slika 4.5.2. Prikaz odabira lokacije na kojoj će hibridni sustav biti smješten .....	22
Slika 4.5.3. Prikaz godišnje potrošnje po mjesecima pomoću PV*SOL programa .....	22
Slika 4.5.4. Prikaz postavljenih solarnih modula .....	23
Slika 4.5.5. Prikaz konfiguracije izmjenjivača .....	24
Slika 4.5.6. Prikaz spajanja solarnih modula s izmjenjivačem .....	24
Slika 4.5.7. Prikaz cijene, vijeka trajanja i kapaciteta pražnjenja za sve tri vrste baterija [24] .....	25
Slika 4.5.8. Prikaz strujnog kruga kućnog hibridnog PV-BESS sustava .....	26
Slika 4.6.1. Prikaz raspodjele proizvedene električne energije .....	28
Slika 4.6.2 Prikaz ukupne godišnje potrošnje električne energije na temelju izvora napajanja električnom energijom .....	29
Slika 4.6.3. Prikaz godišnje potrošnje električne energije baterijskog sustava .....	30

## **Popis tablica**

Tablica 4.4. Izračun prosječne potrošnje kroz 4 godišnja doba.....	19
Tablica 4.6.1. Raspodjela proizvedene električne energije .....	27
Tablica 4.6.2. Prikaz godišnje potrošnje električne energije u sustavu .....	29

## **SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI**

Dekarbonizacija kroz hibridne energetske sustave jedna je od metoda smanjenja emisije CO<sub>2</sub> u svijetu. U ovom se završnom radu obrađuje primjer kućanstva s hibridnim PV-BESS energetske sustavom koji se sastoji od kućne solarne elektrane, izmjenjivača, baterijskog sustava i mrežnog priključka. Ovaj hibridni energetski sustav se projektira pomoću PV\*SOL programskog alata. Rezultati dobiveni simulacijom su analizirani te su se pokazali zadovoljavajućima za provedbu procesa dekarbonizacije energetske sektora.

ključne riječi: dekarbonizacija, hibridni energetski sustavi, hibridni PV-BESS sustav, PV\*SOL

## **SUMMARY AND KEY WORDS**

Decarbonization through hybrid energy systems is one type of carbon emission reduction. This final work analyses the example of a household with a hybrid PV-BESS energy system that is made of home photovoltaic system, inverter, battery energy storage system and grid connection. This system is designed using PV\*SOL app. The simulation results were analysed and they showed positive outcomes for decarbonization of the energy sector.

key words: decarbonization, hybrid energy systems, hybrid PV-BESS system, PV\*SOL