

Primjena stacionarnih baterijskih sustava u kućanstvima

Markotić, Tomislav

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:239260>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-17**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika

**PRIMJENA STACIONARNIH BATERIJSKIH SUSTAVA
U KUĆANSTVIMA**

Diplomski rad

Tomislav Markotić

Osijek, 2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac D1: Obrazac za ocjenu diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju****Ocjena diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju**

Ime i prezime pristupnika:	Tomislav Markotić
Studij, smjer:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. pristupnika, god.	D-1463, 07.10.2022.
JMBAG:	0165083224
Mentor:	izv. prof. dr. sc. Danijel Topić
Sumentor:	Zvonimir Šimić, univ. mag. ing. el.
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	izv. prof. dr. sc. Goran Knežević
Član Povjerenstva 1:	izv. prof. dr. sc. Danijel Topić
Član Povjerenstva 2:	Nemanja Mišljenović, univ. mag. ing. el.
Naslov diplomskog rada:	Primjena stacionarnih baterijskih sustava u kućanstvima
Znanstvena grana diplomskog rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	U diplomskom radu potrebno je opisati baterijske sustave za pohranu električne energije za primjenu u kućanstvu. Napraviti SWOT analizu primjene baterijskih sustava u kućanstvu. Nadalje, na primjeru jedne obiteljske kuće napraviti analizu primjene baterijskog sustava. Definirati scenarije primjene te napraviti tehno-ekonomske proračune za svaki definirani scenarij.
Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	06.07.2024.
Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	Izvrstan (5)
Datum obrane diplomskog rada:	12.7.2024.
Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane):	Izvrstan (5)
Ukupna ocjena diplomskog rada:	Izvrstan (5)
Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij:	12.07.2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****IZJAVA O IZVORNOSTI RADA**

Osijek, 12.07.2024.

Ime i prezime Pristupnika:	Tomislav Markotić
Studij:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	D-1463, 07.10.2022.
Turnitin podudaranje [%]:	11

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Primjena stacionarnih baterijskih sustava u kućanstvima**

izrađen pod vodstvom mentora izv. prof. dr. sc. Danijel Topić

i sumentora Zvonimir Šimić, univ. mag. ing. el.

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak diplomskog rada.....	2
2. PREGLED PODRUČJA TEME.....	3
3. TEHNOLOGIJE, KARAKTERISTIKE I PRIMJENA BATERIJSKIH SUSTAVA POHRANE ELEKTRIČNE ENERGIJE	5
3.1. Olovno-kiselinske baterije	8
3.2. Nikal-kadmij i nikal-metal hidrid baterije	11
3.3. Litij-ionske baterije	15
3.4. Metal-zrak baterije.....	19
3.5. Natrij-sumpor i natrij-nikal klorid baterije	21
3.6. Redoks-protočne baterije.....	24
4. ANALIZA MOGUĆNOSTI I POTENCIJALA PRIMJENE BATERIJSKIH SUSTAVA POHRANE U KUĆANSTVIMA.....	27
4.1. SWOT analiza primjene stacionarnih baterijskih sustava u kućanstvima	27
4.1.1. Jakosti.....	30
4.1.2. Slabosti	31
4.1.3. Prilike	32
4.1.4. Prijetnje.....	32
4.2. Primjeri trenutno dostupnih stacionarnih baterijskih sustava za kućanstva na tržištu	33
4.2.1. Tesla Powerwall	33
4.2.2. Huawei Luna.....	36
4.2.3. Panasonic Evervolt.....	38
4.2.4. Varta element backup	41
5. TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA PRIMJENE STACIONARNIH BATERIJSKIH SUSTAVA POHRANE NA PRIMJERU KUĆANSTVA.....	44
5.1. Ulazni podaci za tehno-ekonomsku analizu.....	44
5.2. Operativni scenarij – kućanstvo bez FN elektrane i baterijskog sustava pohrane električne energije.....	50
5.3. Operativni scenariji – kućanstvo s FN elektranom.....	53
5.3.1. Kućanstvo s FN elektranom instalirane snage 2 kW	55

5.3.2.	Kućanstvo s FN elektranom instalirane snage 3,5 kW	63
5.3.3.	Kućanstvo s FN elektranom instalirane snage 5 kW	67
5.4.	Operativni scenariji – kućanstvo s FN elektranom i baterijskim sustavom pohrane električne energije.....	72
5.4.1.	Kućanstvo s FN elektranom instalirane snage 2 kW i baterijskim sustavom pohrane električne energije.....	74
5.4.2.	Kućanstvo s FN elektranom instalirane snage 3,5 kW i baterijskim sustavom pohrane električne energije.....	86
5.4.3.	Kućanstvo s FN elektranom instalirane snage 5 kW i baterijskim sustavom pohrane električne energije.....	91
6.	ZAKLJUČAK.....	93
	LITERATURA.....	95
	SAŽETAK	100
	ŽIVOTOPIS.....	101
	POPIS SLIKA I TABLICA	102

1. UVOD

U današnje vrijeme javlja se sve veća potreba za povećanjem učinkovitosti i smanjenjem emisija stakleničkih plinova u procesima proizvodnje, prijenosa, distribucije i krajnjeg korištenja električne energije. Sposobnosti za igranje jednu od ključnih uloga u procesu energetske tranzicije mogu imati sustavi za pohranu električne energije. Sustavi za pohranu električne energije nude brojne mogućnosti elektroenergetskom sustavu, poput pružanja primarne i sekundarne regulacije sustava i smanjenja vršne snage. Stoga je ulaganje u navedene sustave nužno kako bi se maksimizirali svi mogući benefiti koje sustavi za pohranu električne energije mogu donijeti elektroenergetskom sustavu.

Ovaj diplomski se bavi proučavanjem tehnologija baterijskih sustava pohrane električne energije. Baterijski sustavi pohrane doživljavaju sve veću popularnost te se instalirana snaga baterijskih sustava pohrane povećava iz godine u godinu. U ovome diplomskome radu bit će opisane najčešće korištene tehnologije baterijskih sustava pohrane električne energije koje su trenutno u primjeni. Bit će opisane i prikazane njihove glavne karakteristike kao i međusobna usporedba samih tehnologija te njihove trenutne tržišne mogućnosti. Izazov ovoga diplomskoga rada je prikazati mogućnosti primjene stacionarnih baterijskih sustava u kućanstvima. Navedena primjena se promatra iz razloga jer su trenutno najčešće primjene baterijskih sustava pohrane električne energije napravljene za sustave srednje i visoke snage koje se odnose uglavnom na zbijanja u elektroenergetskom sustavu na srednjem naponu. Ovim radom žele se prikazati realne mogućnosti i izazovi pri integraciji baterijskih sustava pohrane električne energije u prosječno kućanstvo.

Diplomski rad se sastoji od šest poglavlja. Prvo poglavlje čine uvod te zadatak diplomskoga rada unutar kojega je predstavljen diplomski rad te dan okvirni opis diplomskoga rada. Drugo poglavlje je pregled područja teme u kojemu je opisana literatura iz promatranog područja te su navedene metode kojima je obrađena promatrana tema diplomskoga rada. U trećem poglavlju su detaljno opisane sve tehnologije sekundarnih i protočnih baterija, dan je prikaz i usporedba glavnih karakteristika svih obrađenih tehnologija baterijskih sustava pohrane električne energije te trenutna područja primjene svih navedenih tehnologija. Četvrto poglavlje se bavi analizom mogućnosti primjene stacionarnih baterijskih sustava u kućanstvima. U sklopu četvrtog poglavlja izrađena je SWOT analiza te su prokomentirane sve stavke navedene analize. Također, u četvrtom poglavlju su prikazani i opisani trenutno tržišno dostupni primjeri baterijskih sustava pohrane za kućanstva. Prikazane su glavne karakteristike promatranih baterijskih sustava te je napravljena

usporedba između navedenih sustava. Sve cijene prikazanih baterijskih sustava pohrane su prikazane u € prema sljedećoj konverziji: 1 € = 1,08 \$. Peto poglavlje se bavi praktičnim dijelom ovoga diplomskoga rada, odnosno napravljena je tehno-ekonomska analiza primjene stacionarnih baterijskih sustava na primjeru jednog kućanstva. Tehno-ekonomska analiza je napravljena za više slučajeva instalirane snage FN elektrane (FN elektrane) i različitih baterijskih sustava pohrane. Pomoću tehno-ekonomske analize je donesen zaključak o isplativosti ulaganja u baterijske sustave pohrane promatranom kućanstvu. U šestom poglavlju ovoga diplomskoga rada dan je konačni zaključak te završna riječ diplomskoga rada na promatranu tematiku diplomskoga rada o mogućnosti primjene stacionarnih baterijskih sustava u kućanstvima.

1.1. Zadatak diplomskog rada

Zadatak ovoga diplomskoga rada je navesti i objasniti tehnologije baterijskih sustava pohrane električne energije te prikazati karakteristike svake promatrane tehnologije. Osim toga, potrebno je navesti i objasniti moguće primjene baterijskih sustava pohrane električne energije te analizirati mogućnosti primjene baterijskih sustava pohrane električne energije u kućanstvima. Također je potrebno izraditi SWOT analizu primjene baterijskih sustava pohrane električne energije u kućanstvima, kao i navesti te opisati trenutno dostupne primjere baterijskih sustava pohrane električne energije na tržištu. U praktičnome dijelu ovoga diplomskoga rada, potrebno je napraviti tehno-ekonomsku analizu primjene baterijskih sustava pohrane električne energije na primjeru jednoga kućanstva, potrebno je donijeti zaključke o isplativosti ulaganja u baterijske sustave pohrane promatranom kućanstvu.

2. PREGLED PODRUČJA TEME

Tijekom posljednjeg desetljeća integracija i razvoj tehnologija pohrane električne energije doživjele su ekspanziju te ogroman interes zbog značajne integracije obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sustav. Ovaj diplomski rad se bavi mogućnostima integracije baterijskih sustava pohrane električne energije u kućanstva.

U ovome poglavlju bit će opisana korištena literatura iz područja baterijskih sustava pohrane električne energije, koja je osnova za identifikaciju trenutnog stanja i budućih izazova koji su stavljeni pred tehnologiju baterijskih sustava pohrane električne energije.

U literaturi [1] autor detaljno iznosi i opisuje sustave pohrane električne energije. Navedena literatura se bavi međusobnom usporedbom tehnologija sustava za pohranu električne energije te mogućnostima koje tehnologije pohrane električne energije mogu pružati elektroenergetskom sustavu. Također, literatura se bavi mogućnostima integracije baterijskih sustava pohrane u elektroenergetski sustav te analizom eventualnih usluga koje baterijski sustavi pohrane mogu pružati elektroenergetskom sustavu.

U literaturi [2] autori opisuju te iznose karakteristike trenutno najpopularnijih tehnologija baterijskih sustava pohrane električne energije. Autori kroz znanstveni rad upućuju na prednosti i nedostatke svake promatrane tehnologije baterijskih sustava pohrane, te iznose trenutno stanje razvijenosti pojedine tehnologije. U ovom znanstvenom radu su također za svaku promatranu tehnologiju baterijskih sustava pohrane električne energije iznesena trenutna područja primjene svake promatrane tehnologije. Zaključno je napravljena konačna usporedba svih promatranih tehnologija i njihovih karakteristika te su doneseni zaključci o razvijenosti svake promatrane tehnologije.

Trenutno stanje kemijskih i elektrokemijskih sustava za pohranu električne energije opisano je u literaturi [3]. U promatranom znanstvenom radu raspravlja se o trenutnim primjenama baterijskih sustava pohrane električne energije kao i budućim komercijalnim mogućnostima primjene baterijskih sustava pohrane električne energije. Doneseni su zaključci o trenutnim trendovima u području baterijskih sustava pohrane i kemijskih sustava pohrane.

Trenutne mogućnosti integracije baterijskih sustava pohrane električne energije u kombinaciji s FN elektranom u kućanstvima opisane su u literaturi [4]. Navedena literatura se bavi identičnom tematikom kao i ovaj diplomski rad, no ova literatura se usredotočuje na izračun isplativosti integracije baterijskih sustava pohrane u kućanstva bez subvencija države. Izrađen je simulacijski

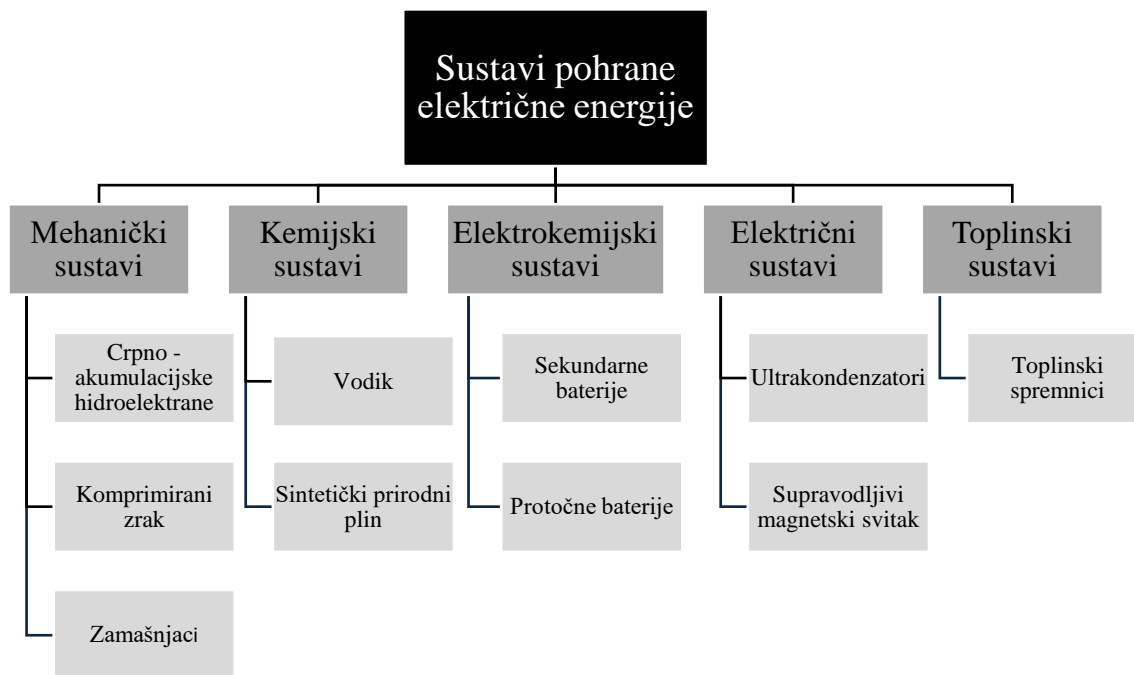
model integracije baterijskog sustava pohrane u Njemačkoj prema cijenama električne energije između 2013. i 2022. godine. Zaključak promatranog znanstvenog rada je povećanje potencijala integracije baterijskih sustava pohrane električne energije kroz uvođenje subvencija od strane države te povećanje optimalne veličine FN elektrane i baterijskih sustava pohrane u budućem razdoblju.

Literatura [5] se bavi tehno-ekonomskom analizom isplativosti integracije baterijskih sustava pohrane električne energije na području Švicarske do 2050. U promatranjoj literaturi definirani su operativni scenariji baterijskih sustava pohrane kao i optimalna veličina FN elektrane za različite profile kućanstava u Švicarskoj. Napravljena je analiza osjetljivosti kako bi se došlo do rezultata tehno-ekonomske analize. Promatrani znanstveni rad se ponajviše bavi izračunom perioda otplate investicije baterijskog sustava pohrane električne energije u kućanstvima. Zaključak tehno-ekonomske analize u navedenom znanstvenom radu jest značajan porast optimalne veličine FN elektrane i baterijskog sustava pohrane električne energije do 2050. Procijenjeni rast integracije baterijskih sustava pohrane u Švicarskoj iznosi s 1 GW instalirane snage iz 2020. na 12 GW instalirane snage do 2050. Svi rezultati istraživanja i zaključci u ovome znanstvenome radu su rezultati definiranog modela i simulacija od strane autora.

Zaključno, baterijski sustavi pohrane električne energije imaju širok raspon mogućnosti primjene u elektroenergetskom sustavu. Baterijski sustavi pohrane električne energije su se počeli značajno razvijati i pokazivati potencijal u primjenama u kućanstvima u kombinaciji s FN elektranom. Pregled literature ovog diplomskog rada je ključan za razumijevanje trenutnog položaja integracije baterijskih sustava pohrane električne energije u kućanstvima, te izazovima koji su postavljeni u vidu istraživanja i razvoja za integraciju promatranih tehnologija u kućanstva.

3. TEHNOLOGIJE, KARAKTERISTIKE I PRIMJENA BATERIJSKIH SUSTAVA POHRANE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Potreba za sustavima pohrane električne energije proizlazi iz nužnosti zadovoljenja očuvanja ravnoteže elektroenergetskog sustava. Osnovna zakonitost elektroenergetskog sustava govori da proizvodnja električne energije u svakome trenutku mora biti jednaka potrošnji električne energije uvećanoj za gubitke u sustavu. Stoga se sustavi za pohranu električne energije nameću kao rješenje, budući da imaju sposobnost pohraniti višak proizvedene električne energije, te dati energiju iz spremnika kada se u sustavu pojavi manjak električne energije. Sustavi za pohranu električne energije se mogu podijeliti prema obliku energije u koji se pohranjuje višak električne energije. [6]

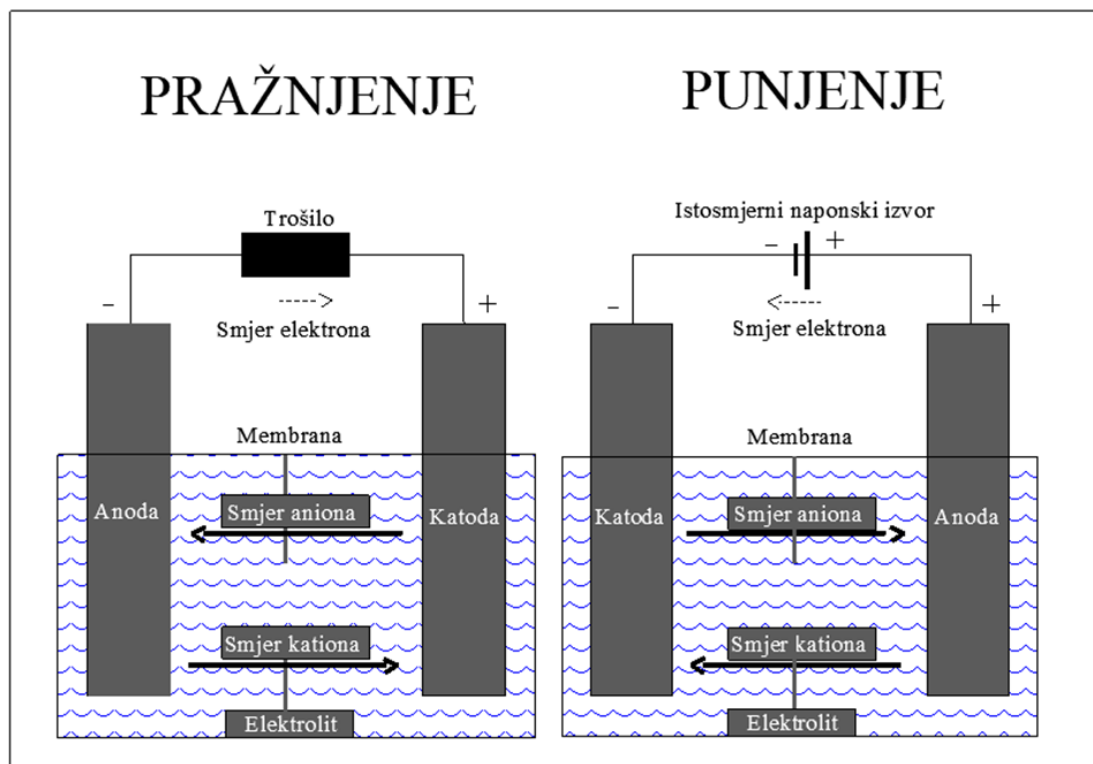


Slika 3.1. Podjela sustava pohrane električne energije [7]

Na slici 3.1. je prikazana osnovna podjela sustava za pohranu električne energije. Svaki od navedenih sustava ima mogućnost pohrane viška električne energije iz elektroenergetskog sustava, te mogućnost ponovne pretvorbe u električnu energiju kada je to elektroenergetskom sustavu potrebno. U ovom diplomskom radu obraditi će se tehnologije, karakteristike te primjena elektrokemijskih sustava za pohranu električne energije s naglaskom na primjenu baterijskih sustava za pohranu energije u kućanstvima.

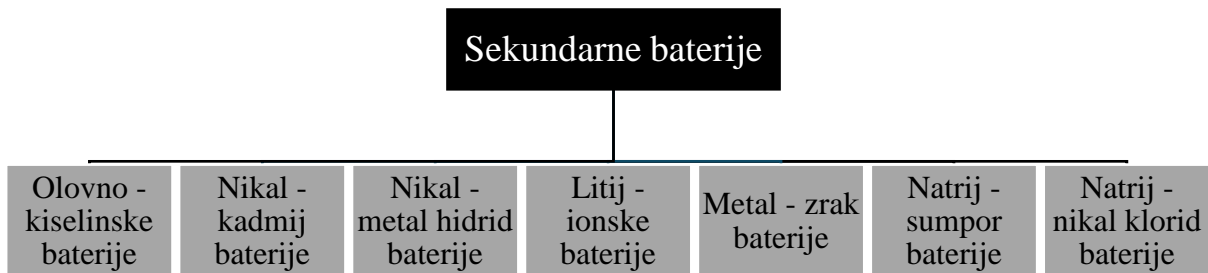
Elektrokemijski sustavi za pohranu električne energije se općenito dijele na sekundarne i protočne baterije. Sekundarne baterije se sastoje od: elektrolita, membrane, katode i anode. Katoda predstavlja pozitivnu elektrodu koja tijekom elektrokemijske reakcije prima elektrone koje je predala anoda, te se katoda tijekom tog procesa reducira. Anoda predstavlja negativnu elektrodu koja tijekom elektrokemijske reakcije predaje elektrone u vanjski krug te oksidira. Elektrolit predstavlja vodenu otopinu koja omogućava prijenos elektrona s anode na katodu. Elektrolit ostaje u sekundarnoj bateriji tijekom cijelog životnog ciklusa baterije. Membrana je izolator te je uronjena u elektrolit kako bi spriječila nastanak kratkog spoja između katode i anode. Membrana mora biti propusna kako se ne bi spriječila razmjena iona između anode i katode. [8]

Na slici 3.2. prikazana je shema punjenja i pražnjenja sekundarnih baterija.



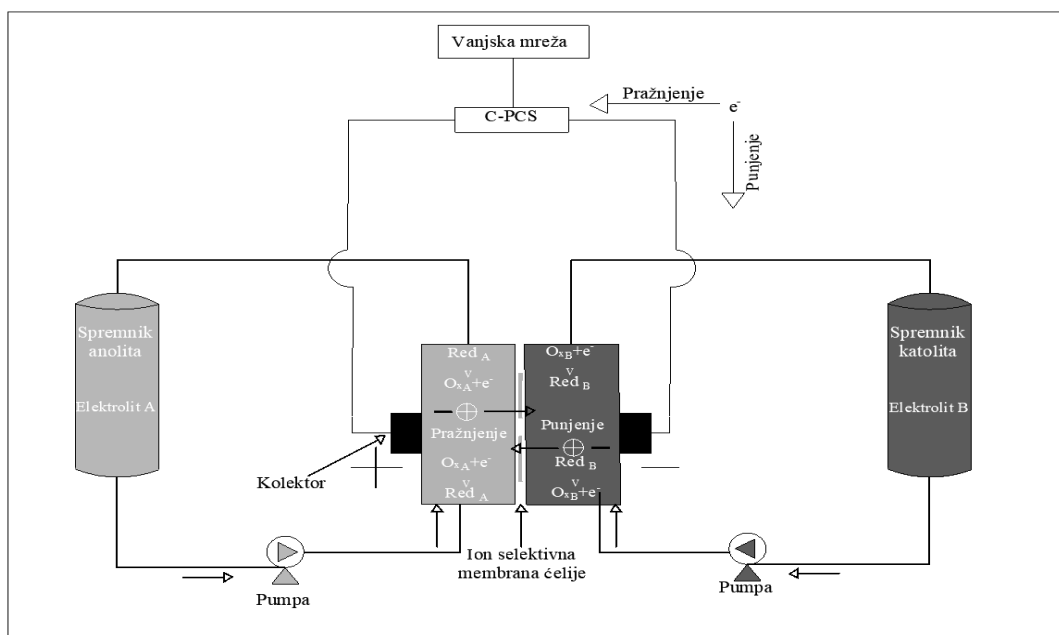
Slika 3.2. Punjenje i pražnjenje sekundarnih baterija [1]

Na slici 3.3. prikazana je podjela sekundarnih baterija prema trenutno razvijenim i dostupnim tehnologijama koje su u primjeni. Navedene tehnologije imaju široku primjenu, te se dodatno razvijaju kako bi mogle pohraniti što veću količinu električne energije iz elektroenergetskog sustava.



Slika 3.3. Podjela sekundarnih baterija [9]

Protočne baterije su tehnologija elektrokemijske pohrane električne energije koja radi na principu elektrokemijskih reakcija u elektrokemijskim ćelijama kao i kod sekundarnih baterija, no razlikuju se po elektrolitu koji se kod protočnih baterija ne čuva trajno u ćelijama, nego se izmjenjuje. Kod protočnih baterija elektroliti se nalaze u zasebnim spremnicima, te se kod procesa punjenja elektroliti pumpaju kroz elektrokemijske stanice, te se materijal koji je uronjen u elektrolit A oksidira na anodi, dok se materijal koji je uronjen u elektrolit B reducira na katodi. U procesu pražnjenja nastaje obrnuti proces. U nastavku je prikazan proces punjenja i pražnjenja protočne baterije. [10]



Slika 3.4. Prikaz punjenja i pražnjenja protočnih baterija [10]

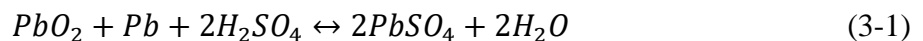
3.1. Olovno-kiselinske baterije

Olovno-kiselinske baterije su najraširenija tehnologija sekundarnih baterija. Počele su se pojavljivati 1890. godine. Ova vrsta baterija koristi se u mobilnim i stacionarnim primjenama. Najčešće primjene ove tehnologije baterija su: sustavi neprekidnog napajanja (UPS engl. *Uninterruptible Power Supply*), starteri za vozila, sustavi napajanja i pohrane energije u otočnim fotonaponskim sustavima te kao baterijski spremnik za ublažavanje fluktuacija energije koje izazivaju vjetroelektrane. [9]

Olovno-kiselinske baterije se sastoje od negativne elektrode koja je napravljena od poroznog olova, porozno olovo se koristi zbog olakšanog stvaranja i otapanja olova. Pozitivna elektroda je napravljena od olovnog oksida. Obje navedene elektrode su uronjene u elektrolitsku otopinu koja je mješavina sumporne kiseline i vode u omjeru 35% sumporne kiseline te 65% vode. [11]

U slučaju da pozitivna i negativna elektroda dođu u međusobni kontakt zbog fizičkog pomicanja baterije ili promjenom debljine elektroda, tada će ih električki izolacijska, ali kemijski propusna membrana odvojiti. Membrana također služi kao zaštita od kratkog spoja kroz elektrolit. [12]

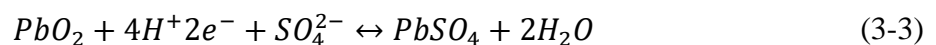
Kemijska reakcija pohrane energije u olovno-kiselinskim baterijama je reverzibilan proces koji je opisan pomoću izraza:



U izrazu (3-1) opisana je kemijska reakcija koja se događa pri procesu punjenja i pražnjenja.



U izrazu (3-2) opisana je kemijska reakcija koje se odvija na negativnoj elektrodi.



U izrazu (3-3) opisana je kemijska reakcija koja se odvija na pozitivnoj elektrodi.

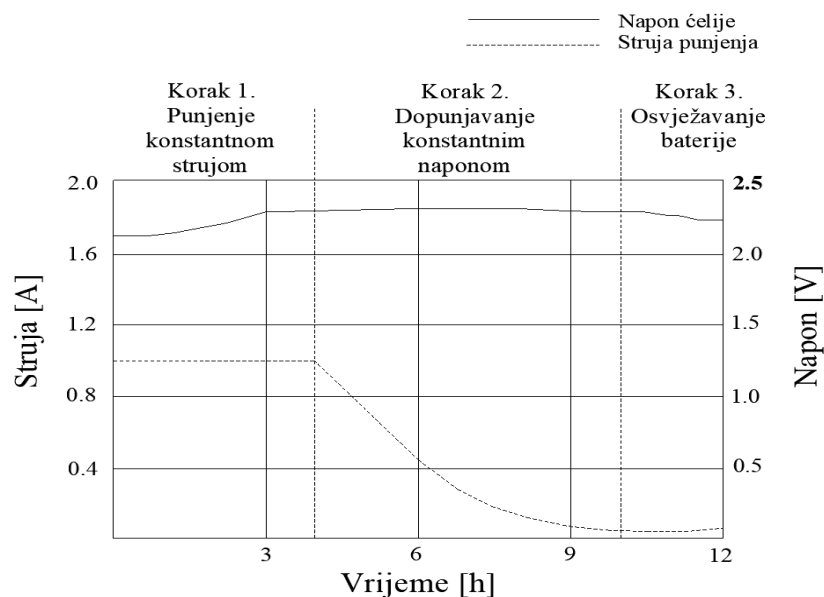
Olovno-kiselinske baterije je moguće podijeliti prema vrsti elektrolita, stoga se razlikuju:

- 1) Nezabrtvljene s tekućim elektrolitom
- 2) Zabrtvljene
 - Zabrtvljene u AGM izvedbi
 - Zabrtvljene u GEL izvedbi

Nezabrtvljene baterije imaju sigurnosni ventil koji služi za ispuštanje plinova nastalih tijekom procesa punjenja. Nakon ispuštanja nastalih plinova obično se javlja gubljenje elektrolita što se smatra negativnom osobinom ovog tipa baterije. Zabrtvljene baterije su dale rješenje za navedeni problem te su stoga one opremljene sa sigurnosnim ventilom koji nakon pojave tlaka većeg od 100 mbar unutar baterije reagira i ispušta plinove van. [13]

Nazivni napon ćelija olovno-kiselinskih baterija obično iznosi 2 V te se ćelije slažu u module koji čine bateriju od 12 V. Karakteristični naponi punjenja za olovno-kiselinske baterije od 12 V iznose 12,9 V te 14,1 V, dok karakteristični napon punjenja ćelije olovno-kiselinske baterije iznosi između 2 V i 2,5 V. Olovno-kiselinske baterije se pune metodom „konstantna struja-konstantni napon“ CC-CV (engl. *Constant Current-Constant Voltage*), odnosno punjenjem u tri koraka:

- Korak 1: Punjenje konstantnom strujom dok napon raste
- Korak 2: Dopunjavanje konstantnim naponom dok struja pada
- Korak 3: Osvježavanje baterije



Slika 3.5. Prikaz punjenja u tri koraka olovno-kiselinskih baterija [17]

Učinkovitost olovno-kiselinskih baterija značajno ovisi i o temperaturi baterije. Olovno-kiselinske baterije nije preporučljivo puniti na temperaturama koje prelaze 49 °C jer im tada učinkovitost značajno pada. Također olovno-kiselinske baterije se ne mogu puniti na temperaturama kada im je elektrolit zaleđen, za potpuno ispražnjenu bateriju elektrolit je zaleđen na 0°C, dok je kod potpuno napunjene baterije temperatura smrzavanja elektrolita -72 °C. Iz toga se zaključuje kako nije moguće puniti ispražnjene olovno-kiselinske baterije na temperaturama ispod 0°C. Broj ciklusa punjenja i pražnjenja koji baterija može odraditi značajno ovisi i o dubini pražnjenja (DoD engl. *Depth of Discharge*). Odnos dubine pražnjenja i broja ciklusa koji baterija može isporučiti je obrnuto proporcionalan. Prema tome pri dubini pražnjenja od 50% očekivani broj ciklusa baterije je 600 – 700 ciklusa, dok je pri dubini pražnjenja od 30% očekivani broj ciklusa može biti i do 1200, pri čemu se smatra da je kraj radnog vijeka baterije u trenutku kada joj kapacitet padne ispod 80% kapaciteta koji posjeduje nova baterija. [13]

Tablica 3.1. Karakteristike olovno-kiselinskih baterija [2]

Karakteristika	Vrijednost
Napon ćelije	2 – 2,1 V
Specifična energija	25 – 50 Wh/kg
Specifična snaga	150 – 400 W/kg
Gustoća energije	25 – 90 kWh/m ³
Gustoća snage	10 – 400 kW/m ³
Učinkovitost	63 – 90 %
Radna temperatura	18 – 45 °C
Broj radnih ciklusa	250 – 2000
Životni vijek	2 – 15 godina
Maksimalna dubina pražnjenja (DoD)	80 %
Stopa samopražnjenja	0,1 – 0,3 % po danu
Nazivna snaga	0 – 20 MW
Trošak energije	40 – 170 €/kWh
Trošak snage	250 – 500 €/kW

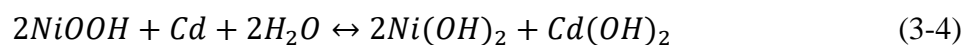
U tablici 3.1. su prikazane glavne karakteristike olovno-kiselinskih baterija. Zaključuje se kako su pozitivne karakteristike olovno-kiselinskih baterija relativno povoljan omjer između cijene i učinkovitosti, budući da su olovno-kiselinske baterije značajno istražena tehnologija baterija. Također pozitivne karakteristike olovno-kiselinskih baterija su mogućnost recikliranja te jednostavan algoritam i koncept punjenja same baterije. S druge strane, negativne karakteristike promatrane tehnologije baterija su: značajan gubitak kapaciteta pri dubokim pražnjenjima, korištenje olova kao materijala, budući da se olovo klasificira kao opasan materijal te niža energetska gustoća koja iznosi 25 do 90 kWh/m³.

3.2. Nikal-kadmij i nikal-metal hidrid baterije

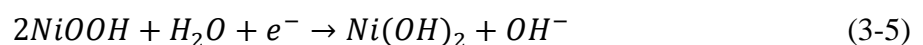
Nikal-kadmij baterije počele su s komercijalnom uporabom oko 1915. godine te također kao i olovno-kiselinske baterije ulaze u grupu zrelih i istraženih tehnologija baterija. Nikal-kadmij baterije za razliku od olovno-kiselinskih baterija imaju općenito nešto veću gustoću snage, gustoću energije te veći broj ciklusa punjenja i pražnjenja tijekom životnog vijeka. [9]

Nikal-kadmij baterija se sastoji od pozitivne elektrode koja je izrađena od nikal-oksidi-hidroksida, negativne elektrode koja je izrađena od kadmija. Kao elektrolit za navedenu tehnologiju se koristi kalijev hidroksid. Kao i kod olovno-kiselinskih baterija pozitivnu i negativnu elektrodu odvaja propusna membrana. [15]

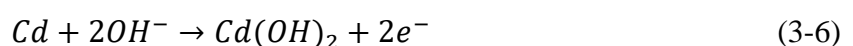
Kemijska reakcija pohrane energije u nikal-kadmij baterijama je reverzibilan proces koji je opisan pomoću izraza:



Izraz (3-4) opisuje kemijsku reakciju punjenja i pražnjenja nikal-kadmij baterije kod koje se lijeva strana izraza kemijske reakcije odnosi na punjenje, dok desna strana izraza kemijske reakcije označava pražnjenje.



Izraz (3-5) opisuje kemijsku reakciju koja se odvija na pozitivnoj elektrodi nikal-kadmij baterije.



Izraz (3-6) opisuje kemijsku reakciju koja se odvija na negativnoj elektrodi nikal-kadmij baterije.

Nikal-kadmij baterije imaju sposobnost rada na vrlo niskim temperaturama kao što su $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Primjene nikal-kadmij baterija su: sustavi neprekidnih napajanja, telefonija, sustavi napajanja i pohrane otočnih fotonaponskih sustava. Kao i olovno-kiselinske baterije, nikal-kadmij baterije se mogu koristiti u stacionarnoj primjeni, odnosno postoji mogućnost korištenja ove tehnologije kao baterijskog sustava pohrane za kućanstva. [15]

Pozitivne karakteristike nikal-kadmij baterija su: niski troškovi održavanja, visok broj ciklusa punjenja i pražnjenja, prikladne su za dugotrajno skladištenje, visok otpor na fizičke i električne učinke. Negativne karakteristike nikal-kadmij baterija su: visoka cijena u usporedbi s olovno-kiselinskim baterijama, ograničena gustoća energije, sadržavanje štetnog i otrovnog materijala kadmija te memorijski efekt koji šteti kapacitetu baterije, a nastaje zbog djelomičnog punjenja i pražnjenja baterije. [2]

Uz sve pozitivne strane koje sadrži ova vrsta tehnologije, nužno je istaknuti da se ova tehnologija u Europi smije koristiti samo za stacionarne primjene, budući da se kadmij pokazao kao toksičan materijal. Od 2006. godine zabranjena je uporaba ove tehnologije za potrošačku namjenu upravo zbog dokazane toksičnosti kadmija. [9]

Tablica 3.2. Karakteristike nikal-kadmij baterija [2]

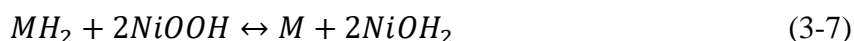
Karakteristika	Vrijednost
Napon ćelije	1,2 – 1,3 V
Specifična energija	30 – 80 Wh/kg
Specifična snaga	80 – 300 W/kg
Gustoća energije	15 – 150 kWh/m ³
Gustoća snage	40 – 140 kW/m ³
Učinkovitost	60 – 90 %
Radna temperatura	-40 – 45°C
Broj radnih ciklusa	1000 – 5000
Životni vijek	10 – 20 godina
Maksimalna dubina pražnjenja (DoD)	80 %
Stopa samopražnjenja	0,2 – 0,6 % po danu
Nazivna snaga	0 – 40 MW
Trošak energije	680 – 1300 €/kWh

Trošak snage	420 – 1300 €/kW
--------------	-----------------

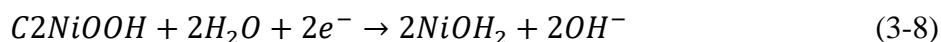
U tablici 3.2. su prikazane detaljne karakteristike nikal-kadmij baterija. U usporedbi s olovno-kiselinskim baterijama zaključuje se kako nikal-kadmij baterije imaju veći životni vijek, veći broj ciklusa punjenja i pražnjenja, veći raspon temperatura pri kojima rade, no nikal-kadmij baterije imaju i veću cijenu po kWh i kW u odnosu na olovno-kiselinske baterije.

Nakon saznanja o toksičnosti kadmija, počele su se razvijati nikal-metal hidrid baterije koje su započele s komercijalnom uporabom 1995. Nikal-metal hidrid baterije građene su od pozitivne elektrode izrađene od nikal-oksida-hidroksida kao i kod nikal kadmij baterije. Negativna elektroda je napravljena od legure koja apsorbira vodik. Kao i kod nikal-kadmij baterija, kao elektrolit se koristi kalijev hidroksid. Također nikal-metal hidrid baterija ima separator koji odvaja pozitivnu i negativnu elektrodu kako bi se spriječio mogući kratki spoj. Kako bi se osigurala sigurnost baterije i zaštita od prepunjenosti ova baterija sadržava i sigurnosni ventil koji u slučaju prepunjenosti ispušta plin iz baterije. [9]

Kemijske reakcije koje se odvijaju tijekom punjenja i pražnjenja su također reverzibilne kao i kod olovno-kiselinskih te nikal-kadmij baterija. Kemijske reakcije punjenja i pražnjenja opisane izrazima:



Izraz (3-7) opisuje kemijsku reakciju punjenja i pražnjenja nikal-metal hidrid baterije kod koje se lijeva strana izraza kemijske reakcije odnosi na punjenje, dok desna strana izraza kemijske reakcije označava pražnjenje.



Izraz (3-8) opisuje kemijsku reakciju koja se odvija na pozitivnoj elektrodi nikal-metal hidrid baterije.



Izraz (3-9) opisuje kemijsku reakciju koja se odvija na negativnoj elektrodi nikal-metal hidrid baterije. [16]

Nikal-metal hidrid baterije imaju svoju uporabu u mobilnim i stacionarnim sustavima. U većini mobilnih sustava u kojima su se koristile su zamijenjene od strane litij-ionskih baterija. Zbog identične vrijednosti napona kao i kod nikal-kadmij baterija, svi uređaji koji su koristili nikal-kadmij bateriju su kompatibilni za korištenje nikal-metal hidrid baterije. Stoga, nikal-metal hidrid baterije nalaze svoju primjenu u: fotoaparata, aparatima za brijanje, kao sustavi neprekidnog napajanja telefoniji, kao sustav pohrane i napajanja za otočne fotonaponske sustave. Osim navedenih primjena, nikal-metal hidrid baterije se koriste u auto-industriji kao baterijski sustavi za hibridne automobile. Također, visoka brzina pražnjenja i sposobnost brzog ponovnog punjenja nikal-metal hidrid baterije čine kandidatom za kombiniranje s gorivnim ćelijama, solarnim ćelijama i drugim baterijama ili motorima s unutarnjim izgaranjem za pokrivanje vršnih opterećenja ili kao rezervni izvor energije kada glavni izvor energije nije dostupan. [16]

Pozitivne karakteristike nikal-metal hidrid baterija su: dug životni vijek baterije, visok broj ciklusa punjenja i pražnjenja tijekom životnog vijeka, dobre performanse na visokim temperaturama, veća sigurnost u odnosu na litij-ionske baterije, ne sadrže toksične materijale, visoka gustoća energije, mogućnost recikliranja, visoka stopa tolerancije na prekomjerno punjenje i pražnjenje baterije. Negativne karakteristike nikal-metal hidrid baterije su: visoki troškovi u odnosu na olovno-kiselinske baterije te loše performanse na niskim temperaturama, značajno niža mogućnost nazivne snage u odnosu na nikal-kadmij i olovno-kiselinske baterije. [2] [9]

U tablici 3.3. bit će prikazane glavne karakteristike nikal-metal hidrid baterija.

Tablica 3.3. Karakteristike nikal-metal hidrid baterija [2]

Karakteristika	Vrijednost
Napon ćelije	1,2 – 1,35 V
Specifična energija	40 – 110 Wh/kg
Specifična snaga	200 – 300 W/kg
Gustoća energije	40 – 300 kWh/m ³
Gustoća snage	10 – 600 kW/m ³
Učinkovitost	50 – 80 %
Radna temperatura	-30 – 70°C
Broj radnih ciklusa	300 – 1800

Životni vijek	2 – 15 godina
Maksimalna dubina pražnjenja (DoD)	100 %
Stopa samopražnjenja	5 – 20 % po danu
Nazivna snaga	0,01 – 3 MW
Trošak energije	170 – 640 €/kWh
Trošak snage	200 – 470 €/kW

U tablici 3.3. prikazane su karakteristike nikal-metal hidrid baterija. Uspoređujući navedene karakteristike u odnosu na nikal-kadmij baterije zaključuje se da nikal-metal hidrid baterije imaju veću specifičnu energiju u odnosu na nikal-kadmij baterije. Također imaju veću gustoću energije, veću gustoću snage, veću mogućnost dubine pražnjenja, te niže troškove u odnosu na nikal-kadmij baterije. No u odnosu na nikal-kadmij baterije, nikal-metal hidrid baterije imaju nižu nazivnu snagu, manji životni ciklus, niži broj ciklusa punjenja i pražnjenja te nižu učinkovitost.

3.3. Litij-ionske baterije

Litij-ionske baterije su trenutno jedna od najraširenijih i najpopularnijih tehnologija baterijske pohrane električne energije. Ova tehnologija je svoju komercijalizaciju započela 1990.-ih godina. Litij-ionske baterije imaju primjenu u mobilnim i stacionarnim sustavima. Navedena tehnologija ima vrlo širok raspon primjene, a neke od primjena litij-ionskih baterija su: mobiteli, prijenosna računala, tableti, električni bicikli, električni automobili, hibridni automobili, veliki baterijski sustavi pohrane za industrijska postrojenja, mogućnost primjene zajedno s velikim fotonaponskim sustavima i vjetroelektranama. Iz navedenog se može zaključiti, kako litij-ionske baterije trenutno dominiraju među tehnologijama baterijske pohrane električne energije. Također, većina trenutnih proizvođača baterija za stacionarne sustave koji su namijenjeni kućanstvima koriste litij-ionsku tehnologiju baterija. [2] [9] [10]

Litij-ionske baterije su kao i ostale sekundarne baterije građene od: pozitivne elektrode, negativne elektrode, elektrolita i separatora. Pozitivna elektroda je napravljena od litij metalnog oksida. Trenutno se u komercijalne svrhe koriste različite kombinacije litija i oksida metala, kao što su:

- 1) Litij kobalt oksid
- 2) Litij nikal kobalt aluminij oksid

- 3) Litij nikel mangan kobalt oksid
- 4) Litij mangan oksid
- 5) Litij željezo fosfat

Negativna elektroda litij-ionskih baterija je napravljena od ugljika, pri čemu kao i kod pozitivne elektrode postoje varijacije izvedbe negativne elektrode. Trenutno se komercijalno koriste sljedeće negativne elektrode:

- 1) Grafit
- 2) Litijev titanat

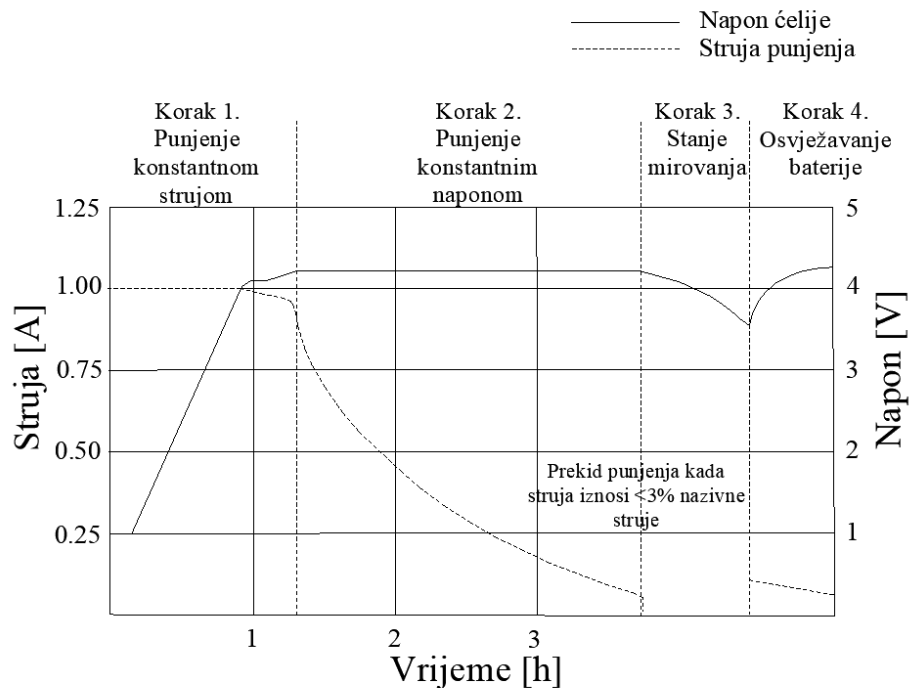
Također u procesu razvitka su i:

- 1) Tvrđi ugljik
- 2) Silicij/ugljik legura

Elektrolit litij-ionske baterije je sačinjen od organskih otapala i litijevih soli. Najčešće korištena organska otapala za elektrolite su: etilen karbonat, dimetil karbonat te dietil karbonat. Najčešće korištene litijeve soli za elektrolit su: litij heksafluorfosfat, litij heksafluorarsenat monohidrat, litij perklorat, litij tetrafluorborat, te litij triflat. Navedena organska otapala i litijeve soli zajedno čine elektrolit čija je svrha omogućiti ionsku vodljivost između pozitivne i negativne elektrode. Separator litij-ionskih baterija je napravljen od polipropilena, polietilena ili njihove kombinacije. Zadatak separatora je električki odvojiti pozitivnu i negativnu elektrodu te onemogućiti kratki spoj između elektroda. [13]

Nazivni napon litij-ionske ćelije iznosi oko 3,7 V što je značajno veći napon ćelije u usporedbi s nikel-metal hidrid baterijama. Iz tog razloga je litij-ionska tehnologija baterija u značajnom dijelu primjene zamijenila nikel-metal hidrid baterije. Litij-ionske ćelije se mogu proizvoditi u više različitih oblika, kao što su cilindričan čvrsti okvir i prizmatičan čvrsti okvir. Što se tiče punjenja i pražnjenja litij-ionskih baterija, najčešće korištena tehnika punjenja i pražnjenja je konstantna struja – konstantni napon (CC-CV). Navedena tehnologija se puni u tri ili četiri koraka ovisno o izvedbi. Prvi korak punjenja litij-ionske baterije je punjenje konstantnom strujom pri čemu napon baterije raste. Drugi korak se sastoji od punjenja baterije konstantnim naponom što rezultira polagano sniženje vrijednosti struje punjenja. Treći korak je stanje mirovanja baterija pri čemu se teži dovođenju napona na optimalnu razinu koja iznosi 3,7 V ukoliko se promatra litij-ionska ćelija. Četvrti korak punjenja je dopunjavanje odnosno osvježavanje baterije pomoću dodatne struje

punjenja kako bi se nakon utjecaja samopražnjenja koje se događa tijekom treće faze stanja mirovanja baterije, baterija ponovno dovela na optimalnu razinu napona koja iznosi 3,7 V. Prikaz opisane metode punjenja litij-ionskih baterija prikazana je na slici 3.6.



Slika 3.6. Prikaz punjenja litij-ionskih baterija u četiri koraka [17]

Punjenje litij-ionskih baterija ima značajan utjecaj i na životni vijek baterije. Moguće je pozitivno utjecati na životni vijek litij-ionske baterije ukoliko se smanji ciljani napon u procesu punjenja unutar prve faze ili ukoliko se izbjegava odnosno smanji vrijeme trajanja druge faze punjenja. Utjecaj prve faze punjenja može dovesti do prepunjenosti baterije što će rezultirati povećanjem tlaka unutar baterije, odnosno dugoročno kraćim životnim vijekom baterije. Druga faza punjenja rezultirati će višim kapacitetom baterije kratkoročno, no dugoročno će to značiti kraći radni vijek. Teoretski najduži životni vijek bi se postigao ukoliko se druga faza punjenja ne bi koristila. [13]

Osim punjenja, način na koji se prazni litij-ionska baterija također može utjecati na životni vijek baterije. Značajan utjecaj na životni vijek ima dubina pražnjenja (DoD) litij-ionskih baterija. Ukoliko se prazni litij-ionsku bateriju sve do dubine pražnjenja 100%, litij-ionska baterija će značajno izgubiti svoj inicijalni kapacitet. Stoga je u većini litij-ionskih baterija ograničena dubina pražnjenja te nakon određene dubine pražnjenja (najčešće) 80% proradi zaštita koja onemogućava daljnje pražnjenje baterije. Osim dubine pražnjenja, značajan utjecaj na životni ciklus litij-ionskih

baterija ima i struja pražnjenja. Ukoliko je struja pražnjenja visoke vrijednosti dolazi do značajnog pada kapaciteta baterije te kraćeg životnog vijeka. [13]

Pozitivne karakteristike litij-ionskih baterija su: široka mogućnost primjene, dug životni vijek, visok broj ciklusa punjenja i pražnjenja tijekom životnog vijeka, visoka gustoća energije, relativno niski troškovi održavanja baterije, nema memorijski efekt što je slučaj kod nikal-kadmij baterija te visoka učinkovitost baterije. Negativne karakteristike litij-ionskih baterija su: pružaju lošije performanse pri visokim temperaturama, visoka cijena u usporedbi s drugim tehnologijama, zahtijevaju zaštitne krugove, sigurnost litij-ionske baterije jer usprkos razvijanju tehnologije i integriranim zaštitama događaju zapaljenja litij-ionskih baterija pri visokim temperaturama u pojedinim primjenama. [2] [7] [9]

U tablici 3.4. su prikazane detaljne karakteristike litij-ionskih baterija.

Tablica 3.4. Karakteristike litij-ionskih baterija [2]

Karakteristika	Vrijednost
Napon ćelije	2,5 – 5 V
Specifična energija	80 – 250 Wh/kg
Specifična snaga	200 – 2000 W/kg
Gustoća energije	95 – 500 kWh/m ³
Gustoća snage	50 – 800 kW/m ³
Učinkovitost	75 – 97 %
Radna temperatura	-20 – 65°C
Broj radnih ciklusa	100 – 10000
Životni vijek	5 – 15 godina
Maksimalna dubina pražnjenja (DoD)	100 %
Stopa samopražnjenja	0,1 – 0,3 % po danu
Nazivna snaga	0 – 0,1 MW
Trošak energije	500 – 2100 €/kWh
Trošak snage	1000 – 3400 €/kW

U tablici 3.4. prikazane su detaljne karakteristike litij-ionskih baterija. U usporedbi s nikal-metal hidrid baterijama, litij-ionske baterije imaju bolje karakteristike u vidu većeg nazivnog napona ćelije, veće specifičnu energiju i snagu, veće gustoću energije i snage, veće učinkovitosti, dužeg životnog vijeka, većeg broja radnih ciklusa punjenja i pražnjenja tijekom životnog vijeka te manju stopu samopražnjenja. No također, litij-ionske baterije imaju neke lošije karakteristike u odnosu na nikal-metal hidrid baterije, kao što su: rad u manjem rasponu temperatura, manju moguću nazivnu snagu te veće troškove. Zaključuje se kako je litij-ionska tehnologija zamijenila u većini primjena nikal-metal hidrid tehnologiju zbog značajno boljih karakteristika, uz još dodatnu mogućnost razvijanja te snižavanja cijene zbog masovne proizvodnje i ulaganja u dodatni razvoj ove tehnologije.

3.4. Metal-zrak baterije

Tehnologija metal-zrak baterija i njen koncept počeli su se komercijalno javljati još 1932. kao cink-zrak baterije. Ova tehnologija se počela istraživati i javljati ranije nego litij-ionske baterije. Kasnije tijekom 20. stoljeća počele su se istraživati i razvijati različite vrste metal-zrak baterija koje su se međusobno razlikovale po korištenju različitih metala za elektrode. Stoga trenutno postoje različite vrste metal-zrak baterija kao što su:

- 1) Cink-zrak baterije
- 2) Željezo-zrak baterije
- 3) Aluminijski-zrak baterije
- 4) Magnezij-zrak baterije
- 5) Litij-zrak baterije
- 6) Natrij-zrak baterije
- 7) Kalij-zrak baterije

Također 2009. se počela razvijati i silicij-zrak baterija. [18]

Općenito, metal-zrak baterije se sastoje od pozitivne elektrode koja je napravljena od katalizatora te poroznog ugljičnog materijala kako bi se olakšala elektrokemijska reakcija. Negativna elektroda metal-zrak baterija je napravljena od metala kao što su: cink, željezo, aluminijski, magnezij, litij, natrij i kalij. Elektrolit metal-zrak baterije je napravljen na bazi vode kod željezo-zrak, cink-zrak, aluminijski-zrak i magnezij-zrak baterija. U slučaju litij-zrak, kalij-zrak te natrij-zrak baterija se koriste ne vodeni elektroliti. Kemijska reakcije se zasniva na tome da kisik iz atmosfere prolazi

kroz proces difuzije kroz pozitivnu elektrodu te tijekom tog procesa katalizator olakšava kemijski proces redukcije, dok se na negativnoj elektrodi odvija proces oksidacije. U konceptu metal-zrak baterija većinu volumena baterijske ćelije zauzima negativna elektroda napravljena od metala, što rezultira visokom gustoćom energije. [19]

Opis kemijske reakcije na primjeru natrij-zrak baterije bit će prikazan u nastavku.



Izrazi (3-10) i (3-11) prikazuju kemijsku reakciju koja se odvija na pozitivnoj elektrodi. Sve kemijske reakcije tijekom punjenja i pražnjenja natrij-zrak baterije su reverzibilne.



Izraz (3-12) prikazuje kemijsku reakciju koja se odvija na negativnoj elektrodi.



Izrazi (3-13) i (3-14) prikazuju kemijske reakcije tijekom procesa punjenja i pražnjenja natrij-zrak baterije. [20]

Najveći teorijski potencijal sa stajališta specifične energije ima litij-zrak baterija čija specifična energija iznosi 11 140 Wh/kg, što je veća specifična energija čak i od benzina čija specifična energija iznosi 10 150 Wh/kg. Također u usporedbi s ostalim baterijama potencijal specifične energije je oko sto puta veći od svih ostalih tehnologija baterija. Najveći problem litij-zrak baterija je sigurnost, budući da reaktivnost litija sa zrakom i vlagom može dovesti do požara. Trenutno je tehnički izvediva samo cink-zračna baterija čija specifična energija iznosi 1350 Wh/kg. Zračne baterije svoju primjenu pronalaze u: medicinskim uređajima, slušnim pomagalicama, hibridna i električna vozila, kao baterijski spremnici u kombinaciji s fotonaponskim sustavima te vjetroelektranama. [1] [7] [9]

Kroz sve navedeno može se zaključiti kako metal-zrak baterije još uvijek nisu dosegnule značajnu komercijalnu uporabu, budući da tehnologija nije razvijena do kraja te nije započela masovna proizvodnja ove tehnologije baterija. Cink-zrak baterije unatoč tehničkoj mogućnosti proizvodnje imaju izazov u vidu razvoja dužeg životnog vijeka, rješavanja problema taloženja elektrolita i nužnost povećanja učinkovitosti. Ostale vrste metal-zrak baterija se također trebaju nastaviti razvijati kako bi se unaprijedile i omogućila mogućnost proizvodnje i uporabe navedene tehnologije baterija. Postoji značajan potencijal u ovoj tehnologiji budući da su relativno niski troškovi materijala za izradu i teorijski ima visoku specifičnu energiju koja je izuzetno bitna karakteristika baterija u svim primjenama, no nužan je dodatan razvoj elektroda, elektrolita, sigurnosti, učinkovitosti, broja ciklusa punjenja i pražnjenja te životnog vijeka baterije.

3.5. Natrij-sumpor i natrij-nikal klorid baterije

Tehnologija natrij-sumpor baterija je razvijena tijekom 1980-ih godina kao tehnologija litij-ionskih baterija. No, nakon uspješne komercijalizacije litij-ionskih baterija, natrij-sumpor baterije su pale u drugi plan. Trenutno se u natrij-sumpor baterijama vidi ogroman potencijal, budući da je Zemljina kora bogata izvorima natrija, te eksploatacija natrija iz Zemljine kore se pokazala financijski prihvatljivom. Stoga su se natrij-sumpor baterije počele smatrati alternativom za litij-ionske baterije u primjenama poput električnih vozila i kao sustav pohrane električne energije u kombinaciji s obnovljivim izvorima energije. [21]

Natrij-sumpor baterije su građene od negativne elektrode koja je napravljena od tekućeg natrija, pozitivne elektrode koja je napravljena od tekućeg sumpora. Pozitivnu i negativnu elektrodu razdvaja kruti beta-aluminijev keramički elektrolit. Natrij-sumpor baterije zahtijevaju rad na temperaturama između 300°C i 350°C kako bi pozitivna i negativna elektroda ostale u tekućem stanju. Za održavanje navedene temperature rada, natrij-sumpor baterijama je potreban dodatan izvor topline, stoga one koriste energiju pohranjenu u njima kao izvor energije. Navedeni princip održavanja temperature utječe na performanse same baterije. Natrij-sumpor baterije su prikladne za uporabu u vidu dnevnih ciklusa. Vrijeme odziva natrij-sumpor baterija je u mili sekundnom rasponu što zadovoljava uvjet za primjenu u stabilizaciji elektroenergetskog sustava i paralelnom radu s obnovljivim izvorima energije. Također natrij-sumpor baterije imaju potencijal u korištenju za komunalne usluge i velike potrošače energije. [2] [7] [9]

Natrij sumpor baterije imaju oko 4500 ciklusa punjenja i pražnjenja tijekom životnog vijeka, vrijeme pražnjenja baterije se kreće između 6,0 h i 7,2 h. Povratna učinkovitost natrij-sumpor baterija iznosi oko 75%. Natrij-sumpor baterije su modularne građe čija se nazivna snaga u komercijalnoj uporabi kreće oko 1 MW. [7] [9]

Pozitivne karakteristike natrij sumpor baterija su: visoka gustoća energije, velik broj ciklusa punjenja i pražnjenja tijekom životnog vijeka baterije te niska stopa samopražnjenja. Negativne karakteristike natrij-sumpor baterija su: visoka cijena te nužnost održavanja visoke temperature pri radu što direktno smanjuje učinkovitost baterije. [2]

U tablici 3.5. prikazane su detaljne karakteristike natrij-sumpor baterija.

Tablica 3.5. Karakteristike natrij-sumpor baterija [2]

Karakteristika	Vrijednost
Napon ćelije	1,8 – 2,71 V
Specifična energija	150 – 240 Wh/kg
Specifična snaga	90 – 230 W/kg
Gustoća energije	150 – 350 kWh/m ³
Gustoća snage	1,2 – 50 kW/m ³
Učinkovitost	75 – 90 %
Radna temperatura	300 – 350°C
Broj radnih ciklusa	2500 – 40000
Životni vijek	10 – 15 godina
Maksimalna dubina pražnjenja (DoD)	100 %
Stopa samopražnjenja	0 % po danu
Nazivna snaga	0,05 – 34 MW
Trošak energije	250 – 420 €/kWh
Trošak snage	850 – 2500 €/kW

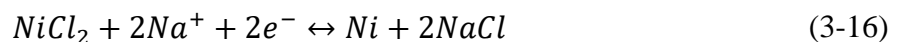
U tablici 3.5. su prikazane detaljne karakteristike natrij-sumpor baterija. U usporedbi s litij-ionskim baterijama, natrij-sumpor baterije imaju bolje karakteristike u vidu: mogućnosti većeg broja ciklusa punjenja i pražnjenja tijekom životnog vijeka, manje stope samopražnjenja, mogućnosti postizanja veće nazivne snage te manjih troškova. Lošije karakteristike u odnosu na litij-ionske baterije su: niži napon ćelije, manja specifična snaga te manja gustoća snage. U ostalim karakteristikama su obje navedene tehnologije podjednake ovisno o izvedbama.

Natrij-nikal klorid baterije poznatije još i kao ZEBRA (engl. *Zeolite Battery Research Africa* – naziv projekta po kojem su dobile ime) baterije su postale komercijalno dostupne 1995. godine. Ova tehnologija baterija radi na gotovo identičnom principu kao i natrij-sumpor baterija u vidu potrebite visoke temperature tijekom rada i iskorištavanja energije koja je pohranjena u bateriji u svrhu održavanja potrebne temperature. Ova vrsta baterija radi na temperaturama između 270°C i 350°C. Razlika u građi u odnosu na natrij-sumpor bateriju je korištenje nikala kao materijala za pozitivnu elektrodu. [7] [9]

Kemijske reakcije koje se odvijaju tijekom procesa punjenja i pražnjenja natrij-nikal klorid baterija su reverzibilne te su opisane u nastavku.



Izraz (3-15) opisuje kemijsku reakciju koja se odvija na negativnoj elektrodi tijekom punjenja (lijeva strana jednadžbe) i pražnjenja (desna strana jednadžbe) natrij-nikal klorid baterije.



Izraz (3-16) opisuje kemijsku reakciju koja se odvija na pozitivnoj elektrodi tijekom punjenja (lijeva strana jednadžbe) i pražnjenja (desna strana jednadžbe) natrij-nikal klorid baterije.



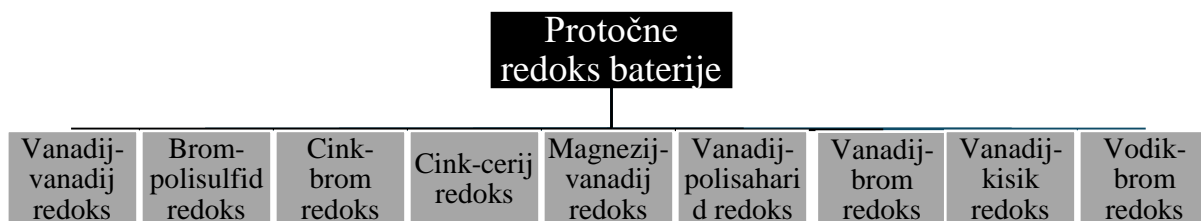
Izraz (3-17) opisuje kemijske reakcije punjenja i pražnjenja natrij-nikal klorid baterije. [22]

Natrij-nikal klorid baterije imaju bolje karakteristike sa stajališta sigurnosti nego natrij-sumpor baterije, te mogu izdržati u ograničenom vremenu prekomjerno punjenje i pražnjenje. Također kao prednost u odnosu na natrij-sumpor baterije je veći napon ćelije. Istaknute karakteristike natrij-nikal klorid baterija su: napon ćelije koji iznosi 2,58 V povratna učinkovitost koja iznosi 85% - 90%, broj ciklusa punjenja i pražnjenja tijekom životnog vijeka iznosi oko 3500, životni vijek koji iznosi 15 godina, specifična energija koja iznosi 120 Wh/kg te specifična snaga iznosi 180 W/kg

Natrij-nikal klorid baterije imaju široku mogućnost uporabe kao i natrij-sumpor baterije. Već su uspješno integrirane u nekoliko električnih automobila. Trenutna istraživanja i razvoj su usmjerena su na poboljšanje karakteristika baterije kako bi se navedena tehnologija mogla uspješno koristiti kao baterija za hibridna i plug-in hibridna vozila. Također razvijaju se i natrij-nikal klorid baterijski spremnici velike nazivne snage kako bi se navedena tehnologija baterija mogla uspješno koristiti u kombinaciji s obnovljivim izvorima energije, industrijskim postrojenjima i sudjelovanju u uravnoteženju elektroenergetskog sustava. [3] [7] [23]

3.6. Redoks-protočne baterije

Redoks-protočne baterije su najpoznatija tehnologija protočnih baterija. Ova tehnologija je ime dobila po kemijskim reakcijama oksidacije i redukcije koje se odvijaju u bateriji. Specifičnost ove vrste tehnologije je da osim pozitivne i negativne elektrode, ova je tehnologija građena i od dva elektrolita, od pozitivnog i negativnog elektrolita koji se još nazivaju katolit i anolit. Još jedna bitna razlika u odnosu na ostale tehnologije baterija je mogućnost zamjene oba elektrolita što kod svih promatranih tehnologija sekundarnih baterija nije moguće. Teoretski, redoks-protočne baterije je moguće napuniti u nekoliko minuta tako što se ispumpa elektrolit koji se nalazi unutar baterije, te se stavi novi elektrolit. Trenutno je u fazi istraživanja i razvoja više vrsta redoks-protočnih baterija koje se međusobno razlikuju po materijalima koji se koriste.



Slika 3.7. Podjela protočnih redoks baterija

Istraživanja su pokazala da od svih navedenih vrsta redoks-protočnih baterija najbolje karakteristike pokazuje vanadij-vanadij redoks-protočna baterija. Vanadij-vanadij redoks-protočna

baterija se razlikuje od ostalih tipova redoks-protočnih baterija po tome jer se koristi jedan element (vanadij) u oba spremnika elektrolita, odnosno koristi se jedan elektroaktivni materijal. Još jedna prednost korištenja jednog elektroaktivnog materijala je smanjenje degradacije unakrsne kontaminacije koja se događa kod drugih redoks-protočnih baterija koje koriste više od jednog kemijskog elementa. [9] [13]

Radna temperatura vanadij-redoks protočnih baterija se kreće između 10 °C i 40 °C zbog održavanja elektrolita u tekućem stanju. Zbog navedenog uvjeta, nužno je da membrana vanadij-redoks protočnih baterija bude napravljena od polimera što rezultira visokim investicijskim troškovima. [13]

Vanadij-redoks protočne baterije sadrže značajan potencijal za različite vrste primjena u elektroenergetskom sustavu poput: neprekidnih sustava napajanja, električnih vozila, stacionarnih baterijskih spremnika za kućanstva, stacionarnih baterijskih spremnika za poslovne zgrade, kao spremnici energije u kombinaciji s fotonaponskim sustavima i vjetroelektranama te kao veliki spremnici energije za industrijska postrojenja. [24]

Pozitivne karakteristike vanadij-redoks protočnih baterija su: visoka razina sigurnosti, brz odziv, velik broj ciklusa punjenja i pražnjenja tijekom životnog vijeka, mogućnost dubokog pražnjenja bez štetnih posljedica za bateriju te niski troškovi održavanja. Negativne karakteristike vanadij-redoks protočnih baterija su: niska gustoća energije te zahtijevaju veliki prostor. Gustoća energije ovisi o koncentraciji vanadija unutar spremnika. [2] [9]

U tablici 3.6. su prikazane detaljne karakteristike vanadij-redoks protočnih baterija

Tablica 3.6. Karakteristike vanadij-redoks protočnih baterija [2]

Karakteristika	Vrijednost
Napon ćelije	1,2 – 1,4 V
Specifična energija	10 – 130 Wh/kg
Specifična snaga	50 – 150 W/kg
Gustoća energije	10 – 33 kWh/m ³
Gustoća snage	2,5 – 33 kW/m ³
Učinkovitost	75 – 90 %
Radna temperatura	5 – 45°C

Broj radnih ciklusa	10000 – 16000
Životni vijek	5 – 15 godina
Maksimalna dubina pražnjenja (DoD)	100 %
Stopa samopražnjenja	0 % po danu
Nazivna snaga	0,03 – 3 MW
Trošak energije	130 – 850 €/kWh
Trošak snage	500 – 1300 €/kW

Na slici 3.8. prikazan je baterijski sustav pohrane u kojemu su integrirane protočne baterije.



Slika 3.8. Prikaz protočne baterije u primjeni [25]

4. ANALIZA MOGUĆNOSTI I POTENCIJALA PRIMJENE BATERIJSKIH SUSTAVA POHRANE U KUĆANSTVIMA

U ovome poglavlju definirati će se pojam SWOT analiza, napraviti će se SWOT analiza primjene stacionarnih baterijskih sustava u kućanstvima te će se donijeti zaključci na osnovnu napravljene SWOT analize. Također, definirati će se mogući operativni scenariji primjene stacionarnih baterijskih sustava u kućanstvima.

4.1. SWOT analiza primjene stacionarnih baterijskih sustava u kućanstvima

SWOT analiza jedna je od najstarijih i najpopularnijih strateških analiza koju je moguće koristiti u gotovo svim područjima. SWOT analiza temelji se na analizi četiri osnovna obilježja, a to su:

- 1) Jakosti (engl. *Strengths*)
- 2) Slabosti (engl. *Weaknesses*)
- 3) Prilike (engl. *Opportunities*)
- 4) Prijetnje (engl. *Threats*)

SWOT analiza može se koristiti za internu i eksternu analizu, ovisno o primjeni za koju se koristi. Najčešće se za određenu primjenu nastoje pronaći jakosti i slabosti u kontekstu trenutnog vremena, te prilike i prijetnje u kontekstu budućeg vremena. Kroz povijest SWOT analiza se pronalazila kao neizostavni dio dugoročnih analiza tržišta i očekivanih analiza prodaje. Kroz vrijeme promatrana analiza postaje sve popularnija upravo zbog svoje jednostavnosti i intuitivnosti. Iz svega navedenoga može se zaključiti kako je SWOT analizu moguće upotrijebiti i u području energetike. [26]

SWOT analiza definira se pomoću matrice koja definira jakosti, slabosti, prilike i prijetnje za određenu primjenu. Zadatak SWOT analize je provjeriti realne mogućnosti i prihvatljivosti određenog proizvoda, projekta ili ideje ovisno o primjeni, analizirajući vanjske prilike i prijetnje te unutarnje jakosti i slabosti. Pomoć pri postizanju određenog cilja SWOT analize su jakosti i prilike, dok su otežavajuće okolnosti slabosti i prijetnje. Nakon što se izvrši SWOT analiza, sljedeći korak je definiranje strategije kojom će se voditi kroz postupak izlaska na tržište ili

razvijanje određenog proizvoda ovisno o primjeni za koju se SWOT analiza radi. Iz SWOT analize proizašla je i TOWS matrica koja se najčešće koristi za definiranje strategije koja će se koristiti. [27]

Na slici 4.1. prikazan je izgled matrice SWOT analize.



Slika 4.1. Prikaz izgleda matrice SWOT analize

Kako je već i navedeno, SWOT analiza pronalazi i svoju primjenu u energetici. U području energetike SWOT analizom su se koristili znanstvenici i poduzetnici kako bi analizirali mogućnosti obnovljivih izvora energije, potencijal i mogućnosti korištenja električnih automobila. Budući da je tema ovog diplomskog rada analizirati mogućnosti primjene stacionarnih baterijskih sustava pohrane električne energije u kućanstvima, bit će napravljena SWOT analiza pomoću koje će se prikazati trenutne jakosti i slabosti primjene baterijskih sustava pohrane električne energije u kućanstvima te moguće prilike i prijetnje koje se mogu pojaviti.

U nastavku slijedi SWOT analize primjene stacionarnih baterijskih sustava u kućanstvima.

Tablica 4.1. SWOT analiza primjene stacionarnih baterijskih sustava u kućanstvima [4] [28][29] [30] [31]

JAKOSTI	SLABOSTI
<ol style="list-style-type: none"> 1) Smanjenje troškova električne energije u kućanstvu 2) Veći stupanj energetske neovisnosti 3) Smanjenje ugljičnog otiska 4) Povećanje postotka potrošnje električne energije vlastite proizvodnje iz FN elektrane 5) Pružanje mogućnosti smanjenja vršne potražnje električne energije kućanstva 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Visoki inicijalni troškovi 2) Ograničen kapacitet baterijskog sustava 3) Potreban prostor za smještaj baterijskog sustava 4) Ograničen životni vijek baterija 5) Potreba za pretvaračima
PRILIKE	PRIJETNJE
<ol style="list-style-type: none"> 1) Mogućnost razvoja sustava poticaja od strane države 2) Povećanje vrijednosti nekretnina 3) Poboljšanje elektroenergetske infrastrukture u ruralnim područjima 4) Mogućnosti pružanja usluga elektroenergetskom sustavu 5) Smanjenje cijene baterijskih sustava kroz daljnji razvoj i povećanu proizvodnju 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Ljudski otpor prema tehnologiji 2) Povećanje cijena sirovina za proizvodnju baterija 3) Prijetnja ostalih tehnologija pohrane u vidu investicija za daljnji razvoj i istraživanje 4) Sigurnosni rizici 5) Reguliranje temperature baterijskog sustava i vanjskih izvora topline prema baterijskom sustavu

U tablici 4.1. prikazana je SWOT analiza primjene stacionarnih baterijskih sustava u kućanstvima. SWOT analiza se sastoji od: jakosti, slabosti, prilika i prijetnji implementacije baterijskih sustava pohrane električne energije u kućanstva. [4] [28] [29] [30] [31]

4.1.1. Jakosti

Jakosti implementacije stacionarnih baterijskih sustava u kućanstva su: smanjenje troškova električne energije u kućanstvu, veći stupanj energetske neovisnosti, smanjenje ugljičnog otiska, povećanje postotka potrošnje električne energije vlastite proizvodnje iz FN elektrane te pružanje mogućnosti smanjenja vršne potražnje električne energije kućanstva. Smanjenje troškova električne energije u kućanstvu se odnosi na dodatne mogućnosti koje baterijski sustav pohrane donosi u kućanstvo, ponajviše na mogućnost punjenja baterije kada postoji višak proizvodnje iz fotonaponskih sustava tijekom dana te korištenje te električne energije tijekom noći. Uz to postoji i mogućnost punjenja baterijskog sustava tijekom noći po nižoj tarifi električne energije, te korištenje baterijskog sustava pohrane tijekom dana kada se električna energija plaća po višoj tarifi. Veći stupanj energetske neovisnosti odnosi se na mogućnosti napajanja kućanstva određeno vrijeme ukoliko dođe do prekida napajanja, tada se baterijski sustav pohrane može koristiti kao sustav neprekidnog napajanja kućanstva, također u otočnim sustavima koji nisu spojeni na elektroenergetsku mrežu, nego su napajani isključivo iz FN elektrane, baterijski sustav pohrane doprinosi većoj pouzdanosti takvog sustava te će u takvome sustavu baterijska pohrana biti svojevrsna regulacija takvog energetskeg sustava, budući da se višak proizvodnje iz fotonaponskog sustava ne može poslati u mrežu, nego se u tom slučaju kada postoji višak proizvedene električne energije pohranjuje u bateriju, te kada postoji manjak proizvodnje električne energije iz FN elektrane tada baterijski sustav pohrane napaja ostatak potražnje. Osim navedenoga, jakost primjene stacionarnih baterijskih sustava jest smanjenje ugljičnog otiska kućanstva, budući da su baterijski sustavi pohrane u kućanstvima zamišljeni da rade u simbiozi s obnovljivim izvorima energije, što rezultira smanjenjem potreba za proizvodnjom električne energije iz fosilnih izvora energije. Povećanje postotka potrošnje električne energije vlastite proizvodnje iz FN elektrane je jakost koja je jednako korisna i kućanstvu i operateru sustava jer s baterijskim sustavom pohrane električne energije u kućanstvu se smanjuju uzlazni tokovi snage prema mreži koji se javljaju u vremenima visoke proizvodnje električne energije tijekom dana iz fotonaponskih sustava, što rezultira povećanjem napona u lokalnoj mreži. Stoga se s implementiranjem baterijskih sustava pohrane smanjuje razmjena električne energije s mrežom u uzlaznom smjeru prema mreži što dodatno čini elektroenergetski sustav stabilnijim. Posljednja navedena jakost u SWOT analizi je pružanje mogućnosti smanjenja vršne potražnje električne energije kućanstva, to se odnosi na mogućnosti baterijskog sustava pohrane da energiju koja je pohranjena u baterijskom sustavu preda kućanstvu u doba najviše potražnje za električnom energijom kućanstva te tako smanji vršnu potražnju, odnosno baterijski sustav omogućuje dodatnu mogućnost kućanstvu za

smanjenje troškova električne energije uz najpopularniju metodu prebacivanja potražnje u doba niske tarife električne energije. [4] [28] [29] [30] [31]

4.1.2. Slabosti

Osim jakosti, implementacija stacionarnih baterijskih sustava pohrane električne energije sadrži i određene slabosti, a to su: visoki inicijalni troškovi, ograničen kapacitet baterijskog sustava, potreban prostor za smještaj baterijskog sustava, ograničen životni vijek baterija te potreba za pretvaračima energetske elektronike. Implementacija baterijskih sustava pohrane u kućanstva osim raznih pozitivnih mogućnosti donosi i visoke investicijske troškove što često zna biti presudan faktor kod ljudi da se ne odluče implementirati takav sustav u svoje kućanstvo. Također, stacionarni baterijski sustavi u kućanstvima imaju ograničen kapacitet, odnosno svaki baterijski sustav može pohraniti točno određenu količinu električne energije, stoga se može dogoditi da baterijski sustav pohrane može napajati kućanstvo kratko vremensko razdoblje ovisno o potražnji, problem je moguće riješiti proširenjem baterijskog sustava no to bi zahtijevalo dodatne investicijske troškove. Još jedna slabost stacionarnih baterijskih sustava u kućanstvima je potreban prostorom za smještaj baterijskog sustava što može biti ograničavajući faktor u nekim kućanstvima u kojima je prostor maksimalno iskorišten. Također osim prostora može doći do dodatnih investicijskih troškova ukoliko se baterijski sustav pohrane želi „sakriti“ kako se ne bi naštetilo estetici kućanstva. Ograničeni životni vijek baterijskih sustava pohrane je također slabost, budući da svaki baterijski sustav pohrane ima određeni broj ciklusa punjenja i pražnjenja tijekom životnog vijeka, te kroz godine baterijski sustavi pohrane doživljavaju degradaciju i trajni gubitak određenog postotka nazivnog kapaciteta. Potreba za pretvaračima je također slabost budući da je za integraciju baterijskih sustava pohrane u kućanstvo potrebno imati izmjenjivač jer su baterijski sustavi pohrane istosmjerni sustavi dok je mreža u kućanstvu izmjenična. [4] [28] [29] [30] [31]

4.1.3. Prilike

Prilike stacionarnih baterijskih sustava pohrane u kućanstvima su: mogućnost razvoja sustava poticaja od strane države, povećanje vrijednosti nekretnina, poboljšanje elektroenergetske infrastrukture u ruralnim područjima, mogućnosti pružanja pomoćnih usluga elektroenergetskom sustavu te smanjenje cijene baterijskih sustava kroz daljnji razvoj i povećanu proizvodnju. Glavna prilika koja može značajno utjecati na atraktivnost i popularnost investicije u stacionarne baterijske sustave u kućanstvima je razvijanje sustava poticaja od strane države, uz koje bi kućanstva smanjila povrat investicije u ovakve sustave te dugoročno kroz povećanje broja investicija smanjila cijenu implementacije stacionarnih baterijskih sustava u kućanstvima. Također ulaganjem u baterijske sustave pohrane rastu vrijednosti nekretnina. Baterijski sustavi pohrane bi u simbiozi s fotonaponskim sustavima mogli značajno utjecati na poboljšanje naponskih prilika u ruralnim područjima, odnosno oplemenili bi elektroenergetsku infrastrukturu u takvim krajevima. Osim toga stacionarni baterijski sustavi u kućanstvima imaju potencijal pružanja usluga elektroenergetskom sustavu jer imaju relativno brz odziv i kroz koncept naprednih mreža i mikromreža bi kućanstva svoje baterijske sustave pohrane mogli staviti na raspolaganje elektroenergetskom sustavu za određenu financijsku dobit. Također kroz visoku stopu implementacije stacionarnih baterijskih sustava u kućanstvima, razvojna i tržišna utakmica između proizvođača ovakvih sustava bi postala sve zanimljivija što bi rezultiralo povećanjem kvalitete, poboljšanim performansama baterija, većom proizvodnjom i posljedično tome smanjenjem cijene. [4] [28] [29] [30] [31]

4.1.4. Prijetnje

Prijetnje na koje implementacija stacionarnih baterijskih sustava u kućanstvima može naići su: Ljudski otpor prema tehnologiji, povećanja cijena sirovina za proizvodnju baterija, prijetnja ostalih tehnologija pohrane u vidu investicija za daljnji razvoj i istraživanje, sigurnosni rizici i reguliranje temperature baterijskog sustava i vanjskih izvora topline prema baterijskom sustavu. Prva prijetnja prema uspješnoj implementaciji baterijskih sustava pohrane u kućanstva jest ljudski otpor prema tehnologiji i promjenama općenito. Značajan problem predstavlja nedovoljna edukacija građana o tehnologiji i benefitima koje donosi što rezultira otporom, također otpor se javlja zbog značajnih početnih investicija u ovakve sustave. Još jedna značajna prijetnja stacionarnim baterijskim

sustavima u kućanstvima je moguće povećanje cijena sirovina koje su potrebne za proizvodnju takvih sustava pohrane, prvenstveno litija, što može rezultirati značajnim povećanjem proizvodnih troškova, odnosno značajnim povećanjem cijene baterijskih sustava pohrane. Treća prijetnja je prijetnja ostalih tehnologija pohrane u vidu investicija za daljnji razvoj i istraživanje. S ovom prijetnjom se susreću sve tehnologije, te daljnji razvoj svih tehnologije pohrane se temelji na istraživanjima mogućnosti implementacije, istraživanju tržišta i mogućoj zaradi. Sukladno tome proizvođači i investitori u istraživanja i razvoj odlučuju u koju će se tehnologiju ulagati. Sigurnosni rizici su prijetnja implementaciji stacionarnih baterijskih sustava u kućanstvima, budući da su baterijski sustavi pohrane zapaljivi i mogu biti opasni po život. Stoga osim same implementacije takvih sustava, kućanstvo se mora pobrinuti oko sigurnosnih protokola odvajanja takvog sustava od dodira djece te odvajanja sustava od doticaja s visokom količinom vlage. Također reguliranje temperature baterijskog sustava i vanjskih izvora topline prema baterijskom sustavu je prijetnja i veliki izazov koji se postavlja pred proizvođače baterijskih sustava pohrane, budući da temperatura značajno utječe na performanse baterijskih sustava pohrane ponajviše na učinkovitost. Konačno se zaključuje kako implementacija stacionarnih baterijskih sustava u kućanstvima ima svoje pozitivne i negativne strane, postoje značajne prilike za razvoj i visoku stopu implementacije ovakvih sustava, no postoje i značajni izazovi koji su prepreke prema širokoj implementaciji stacionarnih baterijskih sustava u kućanstva. [4] [28] [29] [30] [31]

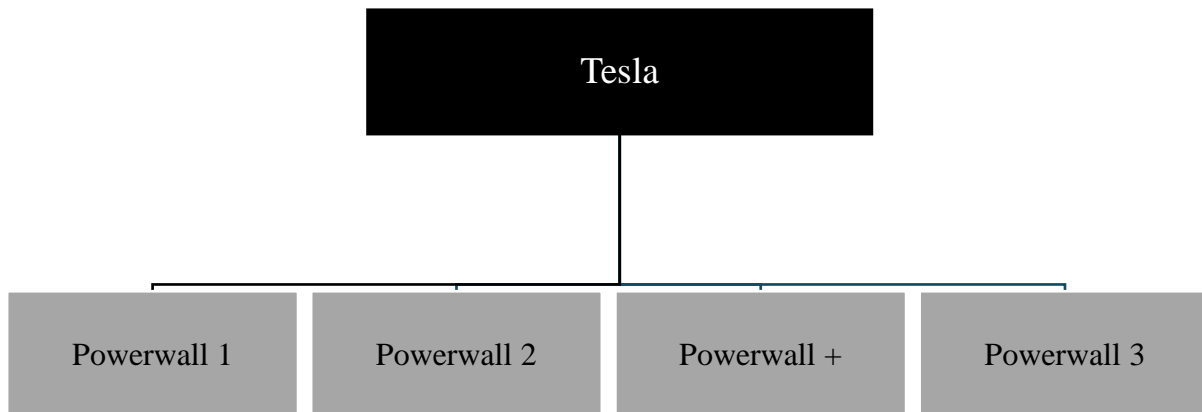
4.2. Primjeri trenutno dostupnih stacionarnih baterijskih sustava za kućanstva na tržištu

U ovome potpoglavlju bit će navedeni i opisani trenutno postojeći stacionarni baterijski sustavi za kućanstva na tržištu. Opisati će se njihove karakteristike i mogućnosti koje pružaju te će se provesti međusobna usporedba navedenih baterijskih sustava.

4.2.1. Tesla Powerwall

Američka kompanija Tesla Inc. razvila je vlastiti baterijski sustav pohrane električne energije za kućanstva koji su nazvali *Tesla Powerwall*. *Tesla Powerwall* je postigao ogroman uspjeh u SAD-u i Kanadi. Specifičnost *Tesle Powerwalla* je što kompanija Tesla pruža mogućnost „ključ u ruke“

u kojemu dolaze zajedno FN elektrana, baterijski sustav pohrane te izmjenjivači zajedno u kompletu. Tesla je do sada proizvela četiri modela *Powerwall-a*, posljednji model koji je stavljen na tržište je *Tesla Powerwall 3* koji je trenutno dostupan samo u Sjevernoj Americi. Dolazak ovoga modela u Europu očekivan je tijekom zime 2024.



Slika 4.2. Prikaz modela Tesla Powerwall [32]

Tesla Powerwall 1 je prvi model baterijskih sustava pohrane koji je kompanija Tesla proizvela i pustila na tržište 2015. *Tesla Powerwall 1* dolazi u dvije izvedbe od kojih je prva kapaciteta pohrane električne energije od 7 kWh dok je druga izvedba kapaciteta pohrane električne energije od 10 kWh. Baterijski sustav *Tesla Powerwall 1* ima mogućnost rada na temperaturama između -20 °C i 43 °C. Masa navedenog sustava iznosi 95 kg u izvedbi od 7 kWh dok u izvedbi od 10 kWh masa iznosi 101 kg. Cijena *Tesla Powerwall 1* sustava prema dostupnim informacijama iznosi između 2 800€ i 4 600€ ovisno o izvedbi. [32]

Tesla Powerwall 2 model baterijskog sustava pohrane za kućanstva je pušten na tržište 2016. dok je 2020. godine napravljena novija verzija *Tesla Powerwall 2* baterijskog sustava pohrane. Navedeni sustav je dostupan u Europi i dolazi u jednoj izvedbi. *Tesla Powerwall 2* dolazi s kapacitetom pohrane električne energije od 14 kWh od kojih je 13,5 kWh iskoristivo. Povratna učinkovitost navedenog sustava iznosi 90 % te ima mogućnost rada na temperaturama između -20 °C i 50 °C. Masa *Tesla Powerwall 2* sustav iznosi 114 kg. Cijena *Tesla Powerwall 2* sustava iznosi prema dostupnim informacijama iznosi između 6 000 € i 7 400 €. [32]

Tesla Powerwall + model baterijskog sustava je pušten na tržište 2021. te je zapravo poboljšana verzija *Tesla Powerwall 2* sustava u kojemu su unaprijeđeni sustavi komunikacije i upravljanja te proširena veličina baterijskih ćelija. Stoga je osnovna razlika masa sustava koja iznosi 156 kg te cijena koja iznosi 7 900 €. [32]



Slika 4.3. Prikaz Tesla Powerwall 3 baterijskog sustava pohrane [33]

Na slici 4.3. prikazan je stacionarni baterijski sustav *Tesla Powerwall 3*. *Tesla Powerwall 3* kao i ostali modeli su predviđeni za ugradnju na vanjsku fasadu ili unutarnje zidove. U nastavku je prikazana tablica 4.2. s karakteristikama navedenog baterijskog sustava pohrane za kućanstva.

Tablica 4.2. Karakteristike Tesla Powerwall 3 baterijskog sustava pohrane [34]

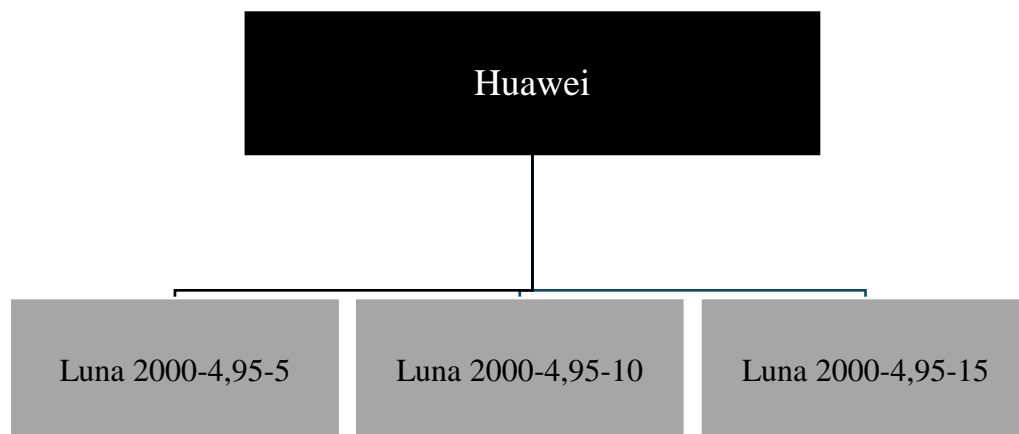
Karakteristika	Vrijednost
Dimenzije sustava	(1,099 x 0,609 x 0,193) m
Masa	130 kg
Kapacitet pohrane	13,5 kWh
Snaga pražnjenja	11,5 kW

Radna temperatura	-20 – 50 °C
Povratna učinkovitost	89 %
Garancija proizvođača	10 godina
Cijena	8700 €

U tablici 4.2. prikazane su glavne karakteristike *Tesla Powerwall 3* baterijskog sustava pohrane. Navedeni sustav sadrži kapacitet pohrane od 13,5 kWh što je relativno velik kapacitet za prosječno kućanstvo. Moguća snaga pražnjenja iznosi 11,5 kW što znači da sigurno može osigurati električnu energiju svim potrošačima u kućanstvu za više od sat vremena, budući da kućanstva uglavnom imaju monofazni priključak snage 7,36 kW ili 9,20 kW. Radna temperatura baterijskog sustava pohrane je između -20 °C i 50 °C. Povratna učinkovitost navedenog sustava iznosi 89 %. *Tesla Powerwall 3* kao i ostali *Powerwall* modeli baterijskih sustava su napravljeni od litijevih baterija. Proizvođač za navedeni sustav daje garanciju od 10 godina, dok cijena investicije prema trenutnim informacijama iznosi oko 8 700 €.

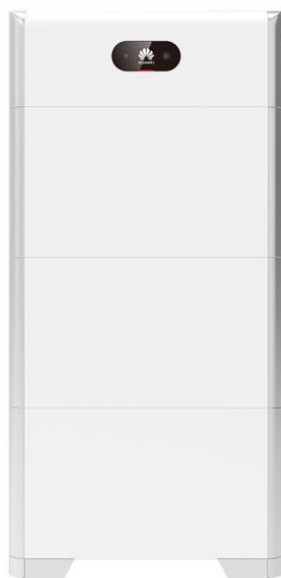
4.2.2. Huawei Luna

Kineski proizvođač potrošne elektronike Huawei razvio je baterijski sustav pohrane za kućanstva koji su nazvali *Luna 2000*. Navedeni baterijski sustav pohrane dolazi u tri izvedbe ovisno o kapacitetu pohrane električne energije. Postoje inačice s kapacitetima od 5 kWh, 10 kWh i 15 kWh. U nastavku je prikazana razdioba navedenih modela prema imenima.



Slika 4.4. Prikaz modela baterijskih sustava pohrane proizvođača Huawei [35]

Specifičnost *Huawei Luna* modela je modularnost, budući da inačice *Luna 2000-4,95-10* i *Luna 2000-4,95-15* su napravljeni od 2 odnosno 3 modula inačice *Luna 2000-4,95-5*. Navedena modularnost omogućava kućanstvima odabir optimalnog modela baterijskog sustava pohrane koji je prikladan za njihovo kućanstvo. Kao i kod proizvođača Tesla Inc., *Huawei Luna 2000* baterijski sustavi pohrane su napravljeni od litij-ionskih baterija te su predviđeni za ugradnju na vanjsku fasadu ili unutarnje zidove građevine. Huawei također osim baterijskih sustava pohrane za kućanstva daje mogućnost integracije fotonaponskih sustava za kućanstva. [35]



Slika 4.5. Prikaz Huawei Luna 2000-4,95-15 baterijskog sustava pohrane [36]

U nastavku je prikazana tablica 4.3. s karakteristikama *Huawei Luna 2000-4,95-15*.

Tablica 4.3. Karakteristike Huawei Luna 2000-4,95-15 baterijskog sustava pohrane [35] [36]

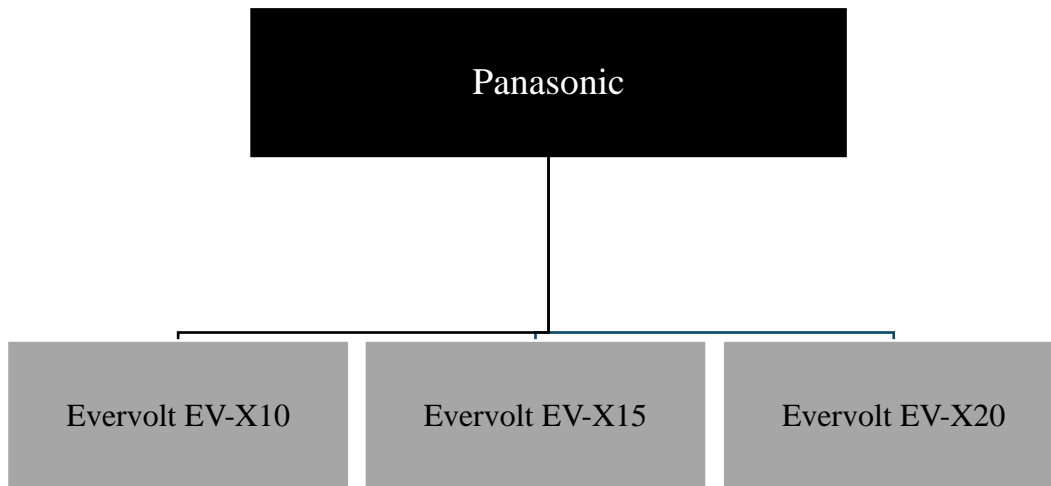
Karakteristika	Vrijednost
Dimenzije sustava	(1,320 x 0,670 x 0,150) m
Masa	163,8 kg
Kapacitet pohrane	13,5 kWh

Snaga pražnjenja	5 kW
Radna temperatura	-20 – 55 °C
Povratna učinkovitost	86 %
Garancija proizvođača	10 godina
Cijena	7689 €

U tablici 4.3. dane su glavne karakteristike *Huawei Luna 2000-4,95-15* baterijskog sustava pohrane električne energije za kućanstva. Huawei baterijski sustav u odnosu na *Tesla Powerwall 3* ima nešto veću masu, većih je dimenzija, također ima veći kapacitet pohrane električne energije za 1,5 kWh te ima veći opseg radne temperature. No, ima manju maksimalnu snagu pražnjenja koja iznosi 5 kW u odnosu na *Tesla Powerwall* koji ima mogućnost pražnjenja snage 11,5 kW. Povratna učinkovitost je također na strani *Tesla Powerwall*-a koja iznosi 89% u odnosu na *Huawei Luna 2000-4,95-15* koji ima povratnu učinkovitost 86 %. Garancija koju daje Huawei identična je onoj koju daje Tesla te iznosi 10 godina, uz to Huawei daje mogućnost nadoplate za još dodatnih 5 godina garancije na baterijski sustav pohrane. Cijena *Huawei Luna 2000-4,95-15* iznosi 7 689 € prema dostupnim informacijama što znači da je nešto jeftiniji sustav u odnosu na *Tesla Powerwall 3*.

4.2.3. Panasonic Evervolt

Japanski proizvođač Panasonic razvio je baterijski sustav pohrane za kućanstva *Panasonic Evervolt*. *Panasonic Evervolt* dolazi u nekoliko izvedbi ovisno o kapacitetu pohrane električne energije. Kao i kod *Huawei Luna* baterijskih sustava i *Panasonic Evervolt* je zasnovan na modularnom sustavu i litijevim baterijama. Tako su trenutno najpoznatiji na tržištu modeli s kapacitetom od 10 kWh, 15 kWh i 20 kWh pohrane, a sačinjeni su od baterijskih modula kapaciteta 5 kWh. [37]



Slika 4.6. Prikaz baterijskih sustava pohrane proizvođača Panasonic [37]

Panasonic Evervolt baterijski sustav pohrane električne energije ima neke jednake specifičnosti kao i *Tesla Powerwall 3* u vidu upravljanja i nadzora sustava te dostupnoj aplikaciji za mobilne uređaje. Panasonic omogućava nadzor putem mobilnog uređaja nad FN elektranom i baterijskim sustavom pohrane električne energije *Evervolt*. Na slici 4.7. će biti prikazan izgled *Panasonic Evervolt EV-X15* sustav pohrane električne energije.



Slika 4.7. Prikaz Panasonic Evervolt EV-X15 baterijskog sustava pohrane [37]

U nastavku je prikazana tablica 4.4. karakteristika *Panasonic Evervolt EV-X15* baterijskog sustava pohrane električne energije.

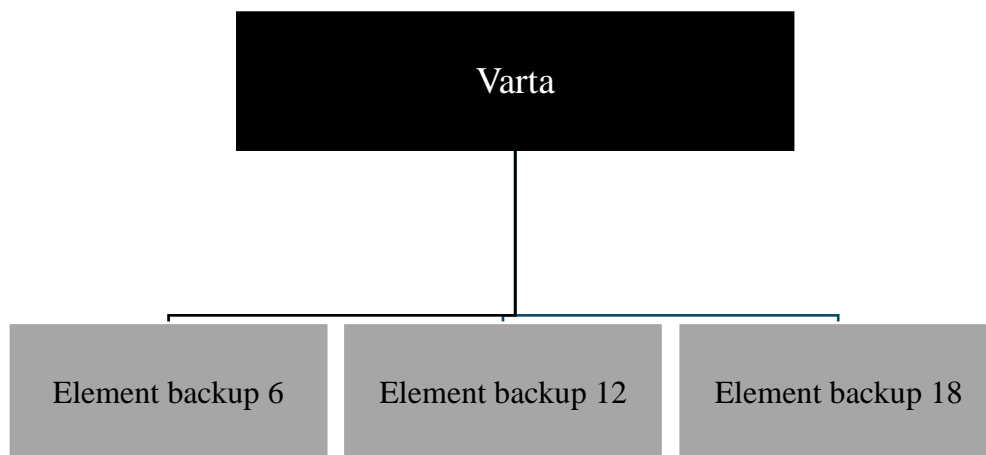
Tablica 4.4. Karakteristike *Panasonic Evervolt EV-X15* baterijskog sustava pohrane [37]

Karakteristika	Vrijednost
Dimenzije sustava	(1,563 x 0,850 x 0,148) m
Masa	210,5 kg
Kapacitet pohrane	13,5 kWh
Snaga pražnjenja	9,19 kW
Radna temperatura	-10 – 50 °C
Povratna učinkovitost	90 %
Garancija proizvođača	12 godina
Cijena	Cijena dostupna isključivo na upit

U tablici 4.4. prikazane su glavne karakteristike *Panasonic Evervolt EV-X15* sustava pohrane električne energije u kućanstvima. U odnosu na *Huawei Luna 2000-4,95-15* ima veće dimenzije, veću masu odnosno potreban je veći prostor nego za Huawei i Tesla baterijski sustav pohrane. Također sadrži mogućnost veće snage pražnjenja u odnosu na *Huawei Luna 2000-4,95-15* od 9,19 kW, no to je manja snaga pražnjenja u odnosu na *Tesla Powerwall 3* sustav koji ima mogućnost snage pražnjenja od 11,5 kW. Radna temperatura *Panasonic Evervolt EV-X15* iznosi između – 10 °C i 50 °C. Povratna učinkovitost promatranog sustava iznosi 90 %. Panasonic daje garanciju od 12 godina na svoje baterijske sustave pohrane što je veća garancija u odnosu na Teslu i Huawei, dok cijena promatranog sustava trenutno nije javno dostupna te ju je moguće dobiti isključivo na upit sektoru prodaje Panasonic-a.

4.2.4. Varta element backup

Njemački proizvođač baterija Varta razvio je vlastitu seriju baterijskih sustava pohrane za kućanstva *Varta element backup*. *Varta element backup* baterijski sustavi kao i Huawei te Panasonic dolaze u tri izvedbe ovisno o kapacitetu pohrane električne energije. Navedeni baterijski sustav građen je od litijevih baterija kao i ostali promatrani baterijski sustavi. Baterijski sustav pohrane već je opremljen s potrebnim pretvaračima energetske elektronike za povezivanje na izmjeničnu mrežu, što je slučaj i kod *Tesla Powerwall*-a, *Huawei Luna 2000* te *Panasonic Evervolt*-a. Varta također omogućava proširenje postojećeg integriranog sustava te daje korisnicima sustav upravljanja i nadzora. Na 4.8. prikazana je razdioba modela baterijskih sustava pohrane električne energije za kućanstva proizvođača Varta.



Slika 4.8. Prikaz baterijskih sustava pohrane proizvođača Varta [38]

Na slici 4.8. prikazani su baterijski sustavi pohrane električne energije *Varta element backup*. Glavna razlika između navedenih sustava je kapacitet pohrane električne energije. *Varta element backup* sustavi predviđeni su za ugradnju na unutarnje zidove građevine u prostorijama u kojima nema vlage te postoji klima uređaj. Varta je poput Panasonica i Tesle razvila vlastiti sustav nadzora i upravljanja te mobilnu aplikaciju u kojoj se može vršiti nadzor nad baterijskim sustavom. Na slici 4.9. prikazan je *Varta element backup 12* sustav.



Slika 4.9. Prikaz Varta element backup 12 baterijskog sustava pohrane [38]

Na slici 4.9. prikazan je izgled *Varta element backup 12* sustava. Zaključuje se kako su izgledom svi promatrani sustavi slični. *Varta element backup* sustavi trenutno su doživjeli najveću popularnost i prodaju na europskom tlu. U tablici 4.5. prikazane su karakteristike *Varta element backup 12* baterijskog sustava pohrane za kućanstva.

Tablica 4.5. Karakteristike Varta element backup 12 baterijskog sustava pohrane [38] [39]

Karakteristika	Vrijednost
Dimenzije sustava	(1,176 x 0,600 x 0,500) m
Masa	165 kg
Kapacitet pohrane	11,7 kWh
Snaga pražnjenja	3,7 kW
Temperatura okoline	5 – 30 °C
Povratna učinkovitost	Nije istaknut podatak
Garancija proizvođača	10 godina
Cijena	7900 €

U tablici 4.5. dane su glavne karakteristike *Varta element backup* 12 baterijskog sustava pohrane. Promatrani sustav ima najniži kapacitet pohrane u odnosu na promatrane od 11,7 kWh te najnižu moguću snagu pražnjenja od 3,7 kW. Masom i dimenzijama veći su jedino od *Tesla Powerwall 3* modela kojem je jedino potreban manji prostor unutar kućanstva. Proizvođač nije istaknuo radnu temperaturu baterije, nego je istaknuo potrebnu temperaturu okoline koja je potrebna za ispravan rad baterijskog sustava pohrane koji iznosi između 5 °C i 30 °C. Kao što je već ranije navedeno, ovaj baterijski sustav pohrane zahtjeva klimatizaciju unutar prostorije u kojoj je smješten. Mora biti smješten u unutrašnjosti građevine te nema tolerancije na vlagu, dok su ostali promatrani sustavi predviđeni za unutarnju ili vanjsku montažu. Podatak o povratnoj učinkovitosti *Varta element backup* 12 sustava nije dostupan. Proizvođač daje garanciju na baterijski sustav pohrane od 10 godina kao i Huawei te Tesla. Cijena promatranog sustava iznosi 7 900 € što ju stavlja u sredinu promatranih sustava budući da je promatrani *Varta element backup* 12 sustav skuplji od *Huawei Luna 2000-4,95-15* kojemu cijena iznosi 7 689 €, dok je jeftiniji od *Tesla Powerwall 3* baterijskog sustav kojemu je cijena 8 700 €, dok *Panasonic Evervolt EV-X15* nema javno dostupnu cijenu. [38]

5. TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA PRIMJENE STACIONARNIH BATERIJSKIH SUSTAVA POHRANE NA PRIMJERU KUĆANSTVA

U ovome poglavlju bit će prikazana tehno-ekonomska analiza mogućnosti primjene stacionarnih baterijskih sustava pohrane električne energije na primjeru jednog kućanstva u Osijeku. Bit će prikazan profil potražnje za električnom energijom navedenog kućanstva te će biti prikazani različiti operativni scenariji primjene baterijskih sustava pohrane električne energije za promatrano kućanstvo.

S razvojem baterijskih sustava pohrane električne energije, sve popularnija postaje ideja integracije baterijskih sustava pohrane električne energije, stoga postoje različite tehno-ekonomske analize isplativosti ulaganja u navedene sustave. Jedna takva tehno-ekonomska analiza bavi se projekcijom integracije baterijskih sustava pohrane električne energije za područje Švicarske do 2050. godine. Navedena tehno-ekonomska analiza ponajviše se bavi izračunom isplativosti ulaganja u promatrane sustave za različite vrste profila potrošača u kućanstvima te periodom otplate investicije. [5]

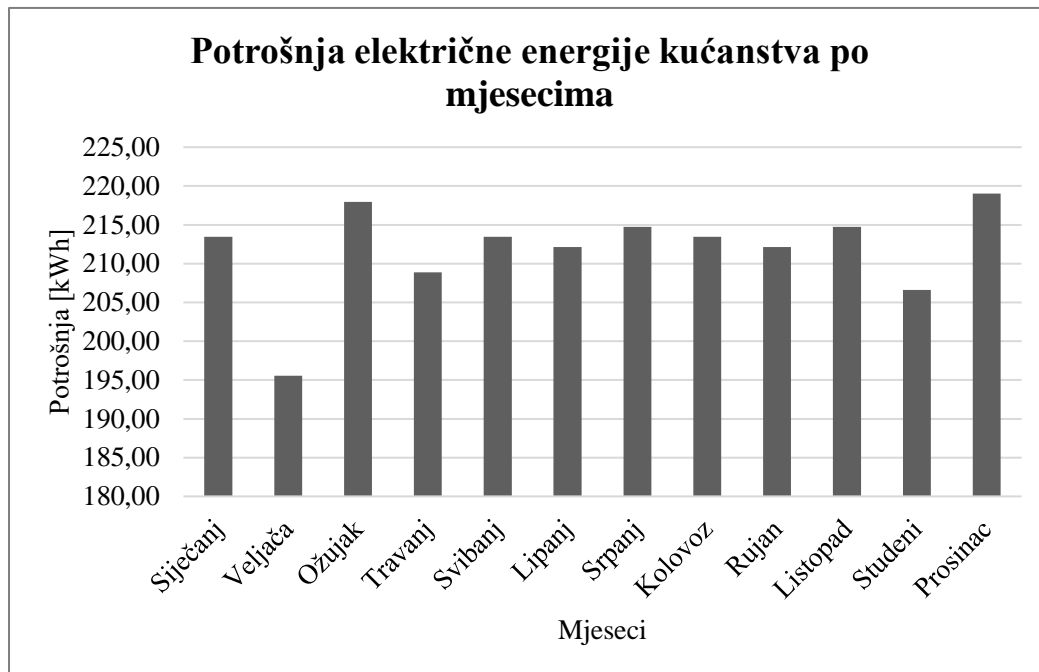
Tehno-ekonomska analiza je izrađena na temelju realnih podataka o potražnji za električnom energijom jednog kućanstva, povijesnim vremenskim podacima o intenzitetu sunčevog zračenja za 2020. godinu u Osijeku, dok su se ostali podaci u tehno-ekonomskoj analizi računali u programskom paketu Excel.

Nakon prikaza svih promatranih operativnih scenarija primjene baterijskih sustava pohrane električne energije u promatranom kućanstvu, donijet će se zaključak o isplativosti ulaganja u baterijske sustave pohrane električne energije za promatrano kućanstvo.

5.1. Ulazni podaci za tehno-ekonomsku analizu

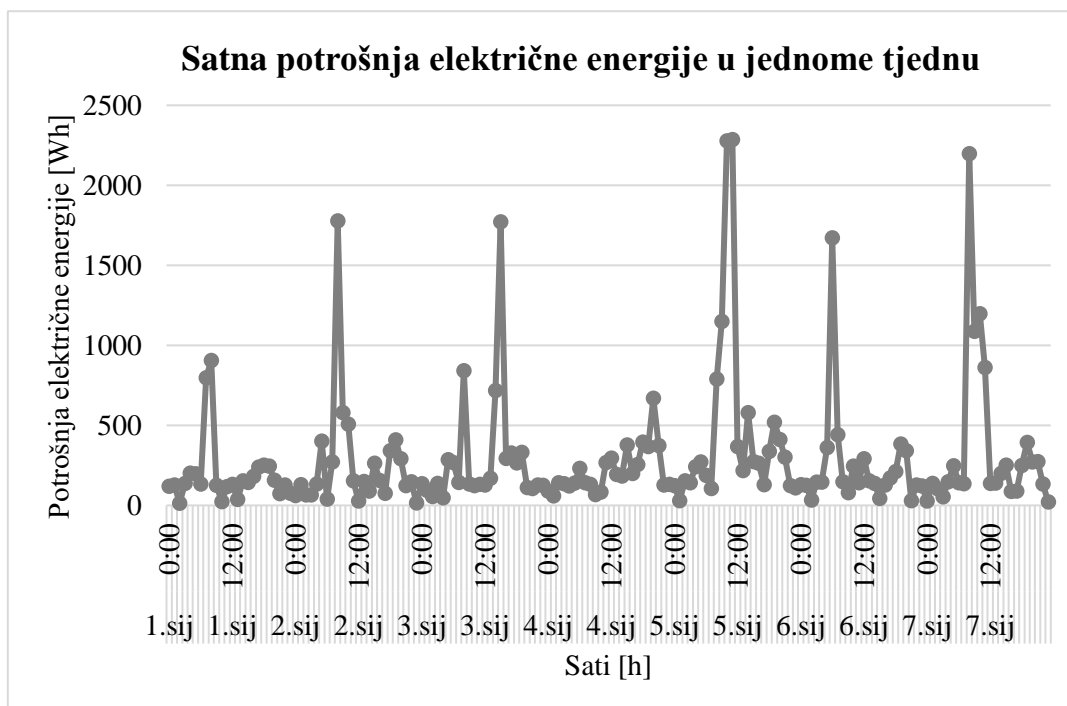
U ovome potpoglavlju bit će prikazani ulazni podaci za tehno-ekonomsku analizu primjene stacionarnih baterijskih sustava u kućanstvima. Bit će prikazan profil potrošnje kućanstva na mjesečnoj razini, te će biti prikazan profil potrošnje promatranog kućanstva za jedan tjedan u ljetnom periodu te za jedan tjedan u zimskome periodu. Osim navedenoga, u ovome potpoglavlju

bit će prikazana sunčeva dozračenost na mjesečnoj razini pomoću kojega se računa proizvodnja električne energije iz FN elektrane. Također bit će prikazana sunčeva dozračenost i temperatura okoline za karakterističan tjedan u ljetnom te zimskom razdoblju. Ostali podaci i koraci izračuna bit će prikazani i objašnjeni u daljnjim potpoglavljima.



Slika 5.1. Prikaz potrošnje električne energije kućanstva po mjesecima

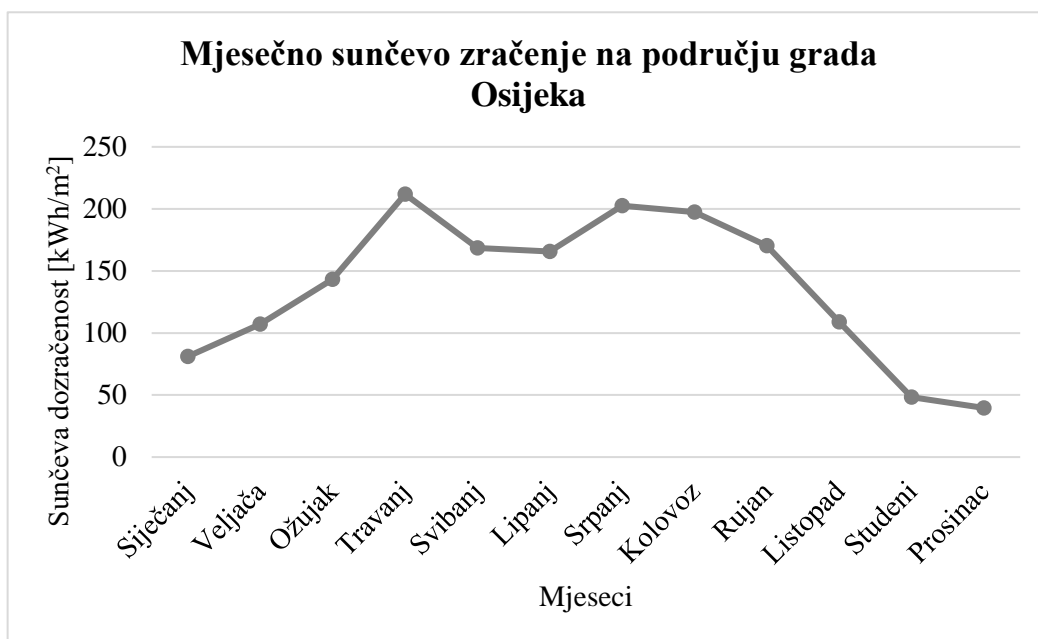
Na slici 5.1. prikazana je potrošnja električne energije promatranog kućanstva za svaki mjesec. Prikazani profil je napravljen prema podacima o satnoj potrošnji promatranog kućanstva, ali zbog preglednosti same tehno-ekonomske analize svi podaci će biti iskazani na mjesečnoj razini. Zaključuje se da promatrano kućanstvo ima uravnoteženu potrošnju bez velikih odstupanja između mjeseci u godini. Najveća potrošnja zabilježena je u prosincu te iznosi 219,02 kWh, dok je najniža potrošnja električne energije zabilježena u veljači što je i očekivano s obzirom na manji broj dana unutar mjeseca te je iznosila 195,56 kWh. Ukupna godišnja potrošnja dobiva se zbrojem pojedinačnih mjesečnih potrošnji te iznosi 2542,17 kWh.



Slika 5.2. Prikaz satne potrošnje električne energije u jednome tjednu

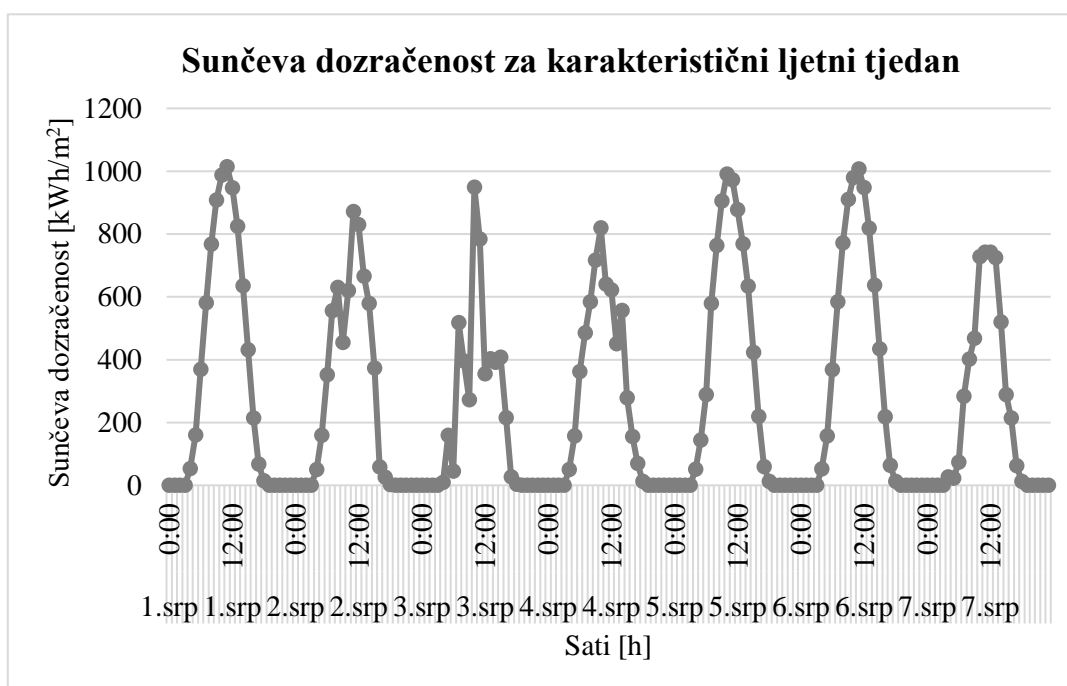
Na slici 5.2. prikazane su satne vrijednosti potrošnje električne energije promatranog kućanstva unutar jednog tjedna. Iz prikazanih vrijednosti dobiva se dojam o navikama potrošnje električne energije promatranome kućanstva. Najveća satna potrošnja u promatranome tjednu je iznosila 2286,49 Wh, 5. siječnja u 11:00.

U nastavku slijedi prikaz mjesečne sunčeve dozračenosti na području grada Osijeka.

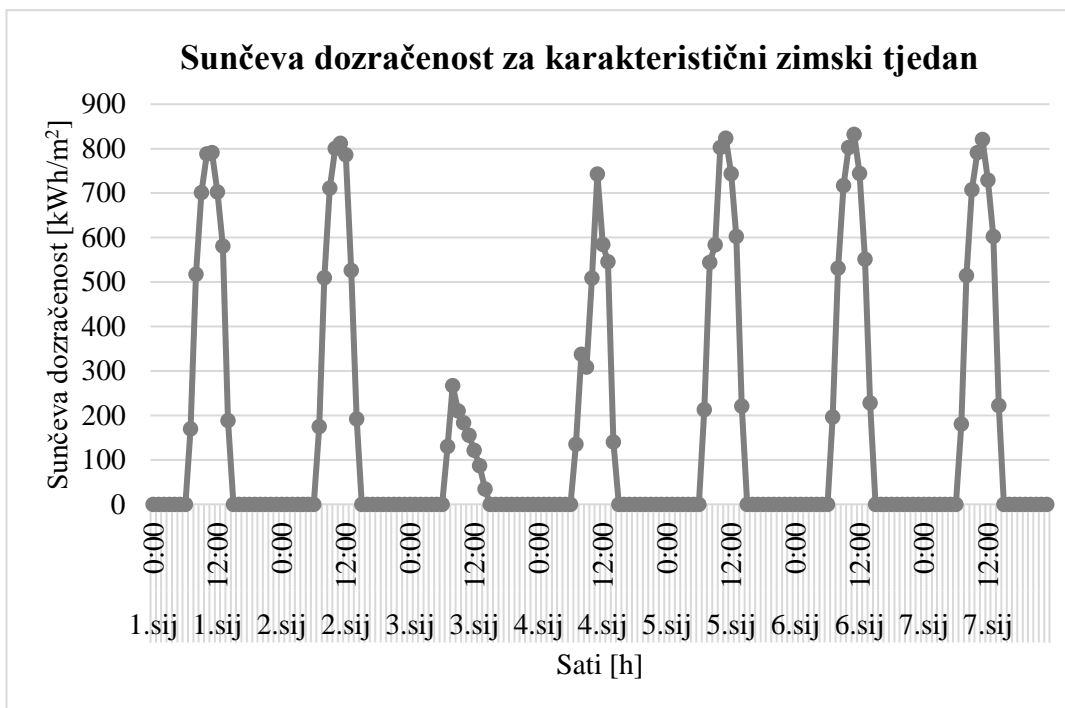


Slika 5.3. Prikaz sunčeve dozačenosti na području grada Osijeka

Na slici 5.3. je prikazana sunčeva dozačenost na području grada Osijeka po mjesecima. Zaključuje se da je najveća sunčeva dozačenost zabilježena u travnju te je iznosila 211,82 kWh/m², dok je najmanja sunčeva dozačenost zabilježena u prosincu te je iznosila 39,62 kWh/m². Ukupan godišnji iznos sunčeve dozačenosti na području grada Osijeka jednaka je sumi mjesečnih vrijednosti sunčeve dozačenosti te iznosi 1644,71 kWh/ m².



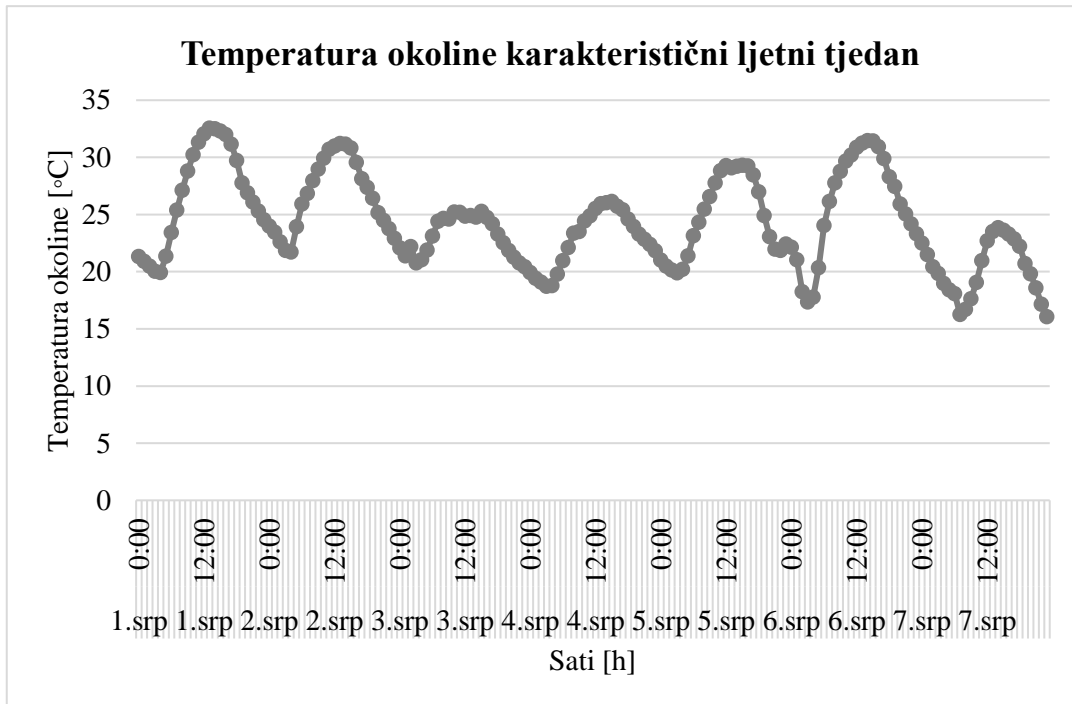
Slika 5.4. Prikaz sunčeve dozačenosti za karakteristični ljetni tjedan



Slika 5.5. Prikaz sunčeve dozračenosti za karakteristični zimski tjedan

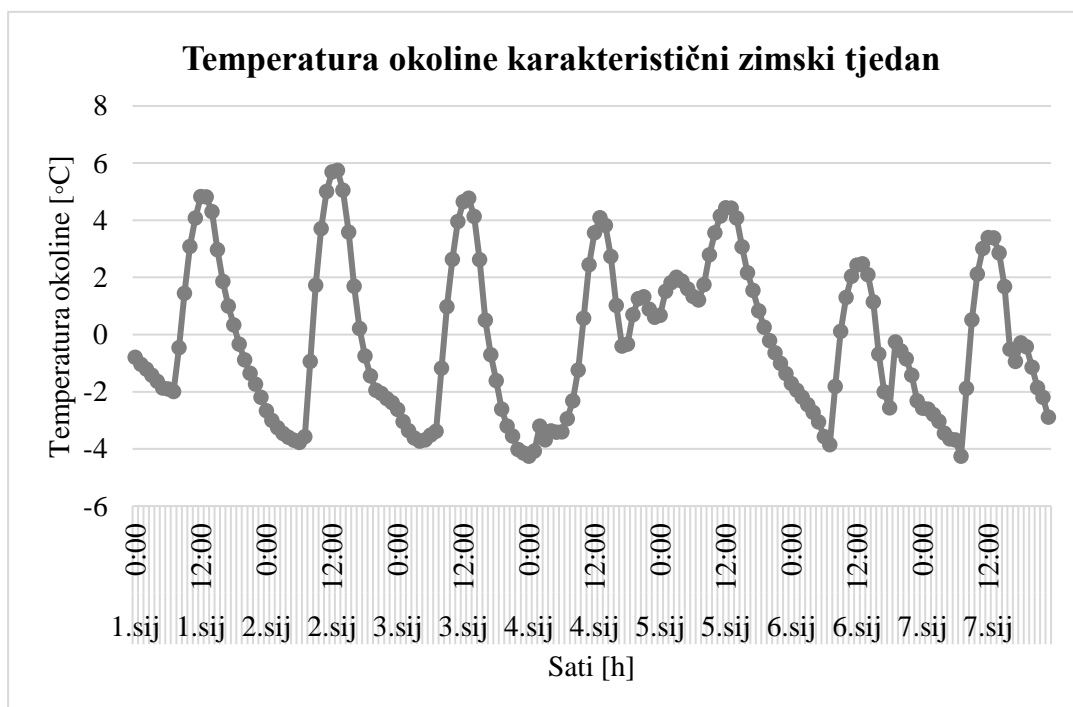
Na slikama 5.4. i 5.5. prikazane su satne vrijednosti sunčeve dozračenosti za karakteristični ljetni i zimski tjedan. Iz slike 5.4. može se zaključiti da se radi o ljetnom periodu budući da je broj sunčanih sati znatno veći. Iz slike 5.5. se zaključuje da je kroz cijeli zimski tjedan bilo sunčano osim 3. siječnja gdje je vidljiv značajan pad sunčeve dozračenosti, dok u ostatku tjedna profil sunčeve dozračenosti izgleda pravilno. Promatrajući slike 5.4. i 5.5. može se zaključiti da osim većeg broja sunčanih sati u karakterističnom ljetnom tjednu, navedeni tjedan sadrži općenito veću sunčevu dozračenost po satnim vrijednostima u odnosu na karakteristični zimski tjedan što je i očekivano s obzirom na godišnja doba.

U nastavku slijedi prikaz prosječne temperature okoline za karakteristični ljetni i zimski tjedan.



Slika 5.6. Prikaz prosječne temperature okoline za ljetni tjedan

Na slici 5.6. prikazane su prosječne dnevne temperature okoline za karakteristični ljetni tjedan. Kao i sunčevo zračenje i temperatura okoline te temperatura FN ćelije ima značajan utjecaj na proizvodnju električne energije iz FN elektrane. Najveća temperatura okoline zabilježena je 1. srpnja u 13:00 te je iznosila 32,5 °C dok je najniža temperatura okoline zabilježena 7. srpnja u 23:00 te je iznosila 16,06 °C.



Slika 5.7. Prikaz prosječne temperature okoline za zimski tjedan

Na slici 5.7. prikazane su prosječne temperature okoline za karakteristični zimski tjedan. Najveća temperatura okoline zabilježena je 2. siječnja u 13:00 te je iznosila 5,75 °C, dok je najniža temperatura okoline zabilježena 7. siječnja u 7:00 te je iznosila -4,26 °C.

U nastavku ove tehno-ekonomske analize bit će prikazani operativni scenariji promatranog kućanstva bez FN elektrane i baterijskog sustava pohrane električne energije, s FN elektranom te s baterijskim sustavom pohrane električne energije i FN elektranom.

5.2. Operativni scenarij – kućanstvo bez FN elektrane i baterijskog sustava pohrane električne energije

U ovome potpoglavlju bit će prikazan osnovni operativni scenarij promatranog kućanstva, slučaj kućanstva bez integrirane FN elektrane i bez baterijskog sustava pohrane električne energije. Pozivat će se na ulazne podatke te će se prikazati troškovi te postupak izračuna troškova za električnu energiju promatranog kućanstva. Promatrano kućanstvo se prema HEP ODS-u klasificira u tarifni model „Bijeli“ unutar kojega se osim potrošnje u višoj i nižoj tarifi obračunava i naknada za obračunsko mjerno mjesto. Viša i niža tarifa potrošnje je definirana od strane HEP ODS-a na sljedeći način:

Viša tarifa – tijekom zimskog računanja vremena traje od 7:00 do 21:00, dok tijekom ljetnog računanja vremena traje od 8:00 do 22:00.

Niža tarifa – tijekom zimskog računanja vremena traje od 21:00 do 7:00, dok tijekom ljetnog računanja vremena traje od 22:00 do 8:00. [40]

Izračun mjesečnih troškova kućanstva isključivo za električnu energiju se računa:

$$Troškovi = E_{VT} \cdot (a_{VT} + b_{VT} + c_{VT}) + E_{NT} \cdot (a_{NT} + b_{NT} + c_{NT}) \quad (5-1)$$

Gdje je:

- E_{VT} [kWh]– Potrošena električna energija u višoj tarifi
- E_{NT} [kWh]– Potrošena električna energija u nižoj tarifi
- a_{VT} i a_{NT} [€/kWh]– Cijena električne energije
- b_{VT} i b_{NT} [€/kWh]– Tarifne stavke za prijenos i distribuciju električne energije
- c_{VT} i c_{NT} [€/kWh]– Naknada za poticanje proizvodnje iz OIE.

Izračun ukupnih mjesečnih troškova za električnu energiju računa se prema sljedećem izrazu:

$$Ukupni\ troškovi = (Troškovi + N_{OMM} + N_O) \cdot PDV \quad (5-2)$$

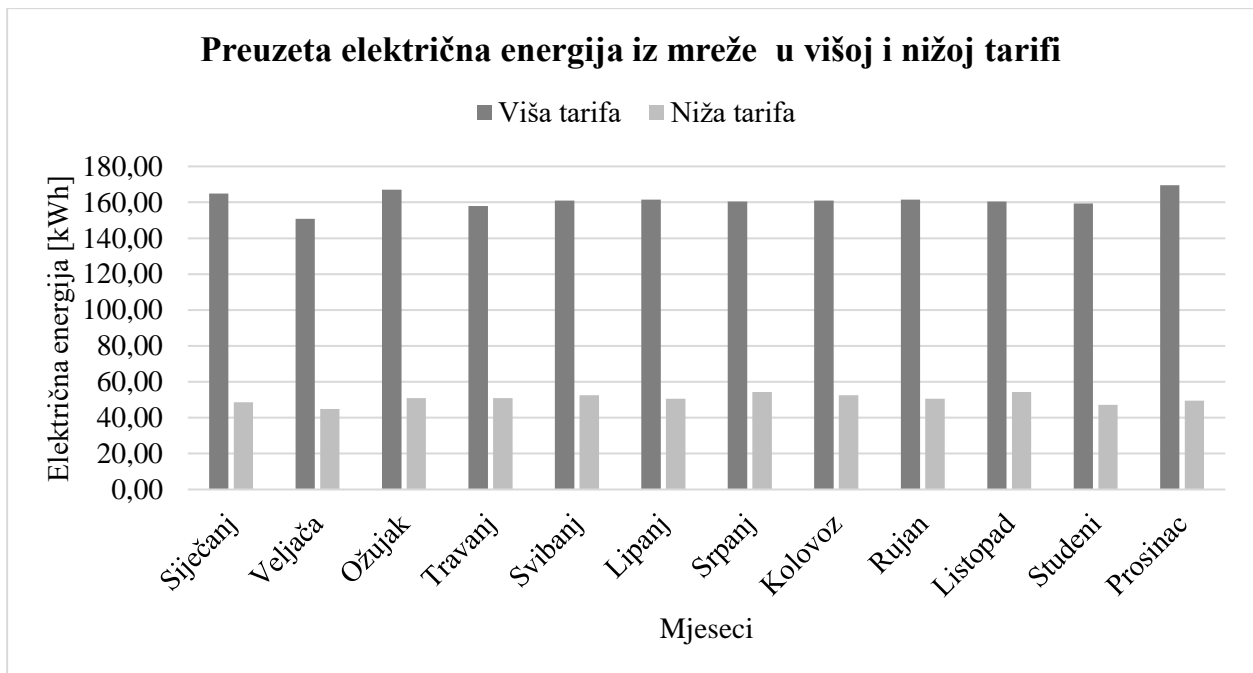
Gdje je:

- N_{OMM} [€] – Naknada za obračunsko mjerno mjesto
- N_O [€] – Naknada za opskrbu
- PDV [%] – Porez na dodanu vrijednost, za električnu energiju iznosi fiksno 13 %.

Tablica 5.1. Tarifne stavke za višu i nižu tarifu [40]

Tarifne stavke	Tarifa	
	VT	NT
Cijena električne energije	0,074789 €/kWh	0,036697 €/kWh
Tarifne stavke za prijenos i distribuciju električne energije	0,051762 €/kWh	0,022563 €/kWh
Naknada za poticanje proizvodnje iz OIE	0,013239 €/kWh	0,013239 €/kWh
Naknada za OMM	0,982 €	
Naknada za opskrbu	1,54 €	

U tablici 5.1. prikazane su tarifne stavke i cijene tarifnih stavki za višu i nižu tarifu prema HEP ODS-u za bijeli tarifni model u kojemu se nalazi promatrano kućanstvo.



Slika 5.8. Mjesečna preuzeta električna energija kućanstva u višoj i nižoj tarifi

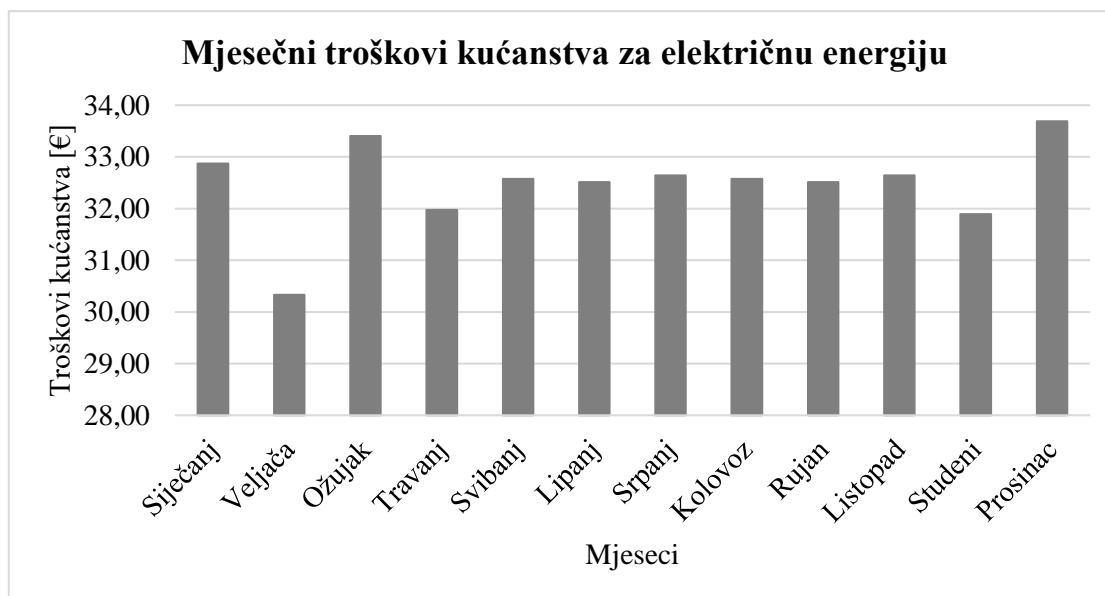
Na slici 5.8. prikazani su podaci o potrošenoj električnoj energiji promatranog kućanstva na razini mjeseca. Iz slike 5.8. može se zaključiti da promatrano kućanstvo troši značajno više električne energije u višoj tarifi. U nastavku će biti prikazan primjer izračuna mjesečnih troškova kućanstva za električnu energiju za mjesec travanj. Izračun se vrši pomoću izraza 5-1 i 5-2. Naglašava se da su sve naknade i tarifne stavke iste u svim slučajevima u svim mjesecima za sva kućanstva te su one propisane od strane HEP ODS-a.

$$\begin{aligned}
 \text{Troškovi} &= E_{VT} \cdot (a_{VT} + b_{VT} + c_{VT}) + E_{NT} \cdot (a_{NT} + b_{NT} + c_{NT}) \\
 &= 157,97 \cdot (0,074789 + 0,51762 + 0,013239) + 50,92 \cdot (0,036697 \\
 &\quad + 0,022563 + 0,013239) = 25,77 \text{ €}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Ukupni troškovi} &= (\text{Troškovi} + N_{OMM} + N_o) \cdot PDV = (25,77 + 0,982 + 1,54) \cdot 1,13 \\
 &= 31,98 \text{ €}
 \end{aligned}$$

Iz prikazanog proračuna se zaključuje da kućanstva osim cijene električne energije kao proizvoda plaćaju i određene naknade i PDV. U travnju promatrano kućanstvo je platilo račun za električnu

energiju u iznosu od 31,98 €. Prema prikazanom proračunu, analogno se računaju računi za električnu energiju u preostalim mjesecima tijekom godine. U nastavku slijedi prikaz troškova električne energije promatranog kućanstva za sve mjesece tijekom godine.



Slika 5.9. Prikaz mjesečnih troškova kućanstva za električnu energiju

Na slici 5.9. prikazani su mjesečni troškovi promatranog kućanstva za električnu energiju. Najčešći raspon mjesečnog računa iznosi između 32 € i 34 €. Najmanji račun za električnu energiju je u veljači te iznosi 30,33 € dok je najveći račun u prosincu i iznosi 33,68 €. Ukupni godišnji troškovi dobiju se zbrojem mjesečnih troškova te iznose 389,63 € za promatrano kućanstvo.

U sljedećim potpoglavljima bit će obrađeni ostali operativni scenariji promatranog kućanstva u kojima će se pokazati isplativost ulaganja u FN elektranu i baterijske sustave pohrane u kućanstvima. Prikazat će se prednosti i nedostaci te važnost dimenzioniranja FN elektrane i baterijskog sustava pohrane sa stajališta troškova.

5.3. Operativni scenariji – kućanstvo s FN elektranom

U ovome potpoglavlju bit će prikazani rezultati tehno-ekonomske analize za promatrano kućanstvo u slučaju integracije FN elektrane instalirane snage 2 kW, 3,5 kW te 5 kW, te će se donijeti zaključci o važnosti dimenzioniranja FN elektrane. Također, bit će prikazani podaci o korištenim FN modulima pri modeliranju FN elektrane, te će biti prikazan postupak izračuna

proizvodnje električne energije iz FN elektrane te izračun otkupne cijene električne energije. Navedene stavke proračuna bit će prikazane samo za jedan slučaj FN elektrane dok će se za ostale slučajeve instalirane snage napraviti isključivo godišnja usporedba svih stavki napravljene tehno-ekonomske analize. Naglašava se da se promatrano kućanstvo klasificira kao kupac s vlastitom proizvodnjom u svim operativnim scenarijima u kojima je integrirana FN elektrana. U nastavku slijedi prikaz karakteristika korištenog modula za modeliranje FN elektrane.

Tablica 5.2. Tehničke karakteristike FN modula Bisol BMO-250 Wp

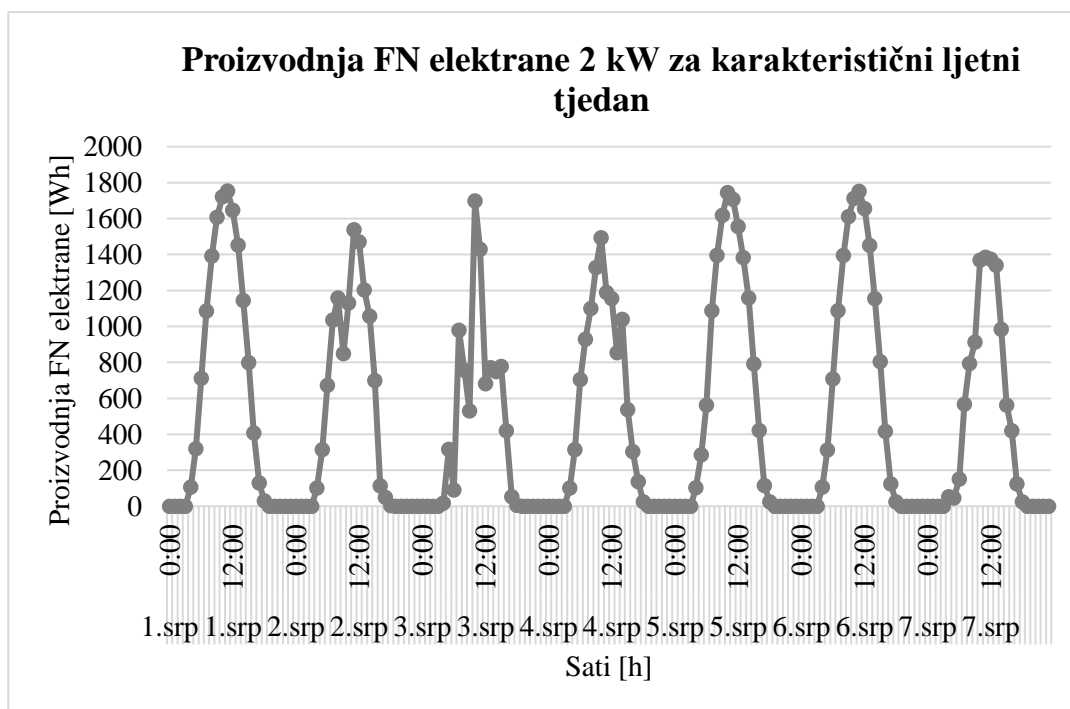
Karakteristika	Vrijednost
Maksimalna snaga, P_{MPP}	250 [W]
Struja kratkog spoja, I_{KS}	8,80 [A]
Napon praznog hoda, V_{PH}	37,9 [V]
Struja MPP, I_{MPP}	8,20 [A]
Napon MPP, V_{MPP}	30,5 [V]
Učinkovitost ćelije, η_C	17,1 %
Učinkovitost modula, η_M	15,3 %
Materijal FN modula	Monokristalni silicij
Temperaturni koeficijent struje, α	+2,9 mA/°C
Temperaturni koeficijent napona, β	-91,8 mV/°C
Temperaturni koeficijent snage, γ	-0,37 %/°C
NOCT	44 °C
Dimenzije (duljina x širina x dubina)	1649 mm x 991 mm x 40 mm
Masa, m	18,5 kg

U tablici 5.2. prikazane su tehničke karakteristike Bisol BMO-250 Wp modula. Navedeni modul će se koristiti za modeliranje i dimenzioniranje FN elektrane promatranog kućanstva u svim operativnim scenarijima tehno-ekonomske analize. Maksimalna snaga Bisol BMO-250 Wp iznosi 250 W, dok je učinkovitost modula 15,3 %. Svi prikazani podaci su bitni za dimenzioniranje i modeliranje FN elektrane.

U nastavku slijedi prikaz tehno-ekonomske analize za operativni scenarij kućanstva s integriranom FN elektranom instalirane snage 2 kW.

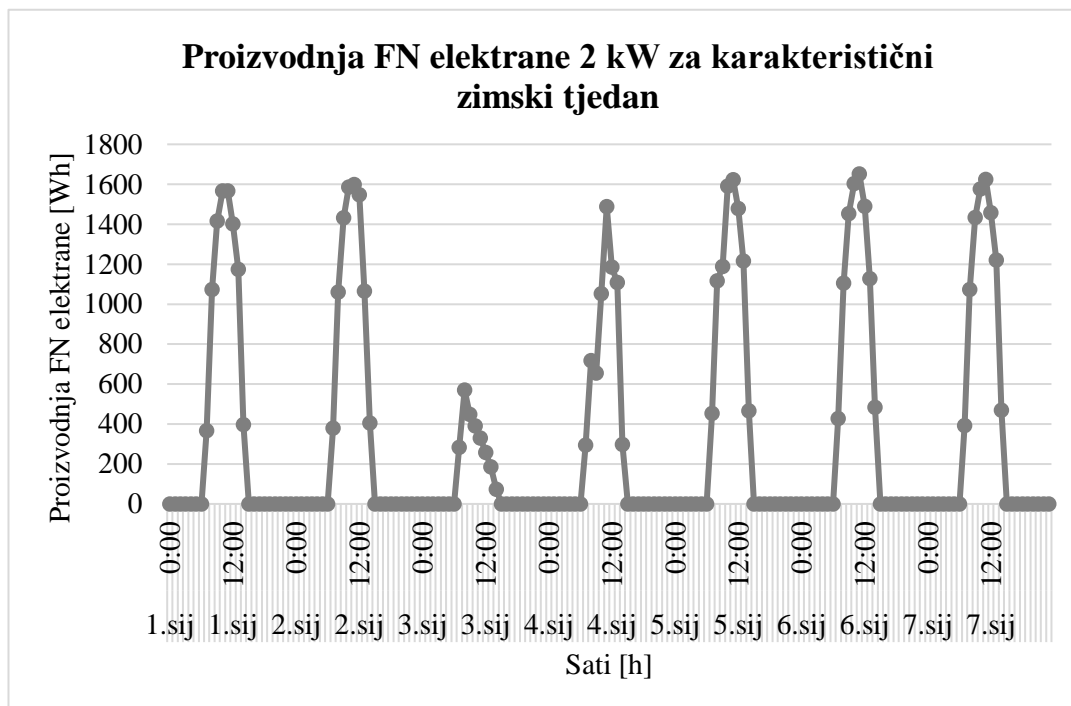
5.3.1. Kućanstvo s FN elektranom instalirane snage 2 kW

U ovome operativnom scenariju pretpostavlja da je u promatranom kućanstvu integrirana FN elektrana instalirane snage 2 kW. Navedena FN elektrana sačinjena je od Bisol BMO-250 Wp modula čije su specifikacije prikazane u potpoglavlju 5.3. ovoga diplomskog rada. Potrošnja električne energije promatranog kućanstva ostaje ista kroz sve operativne scenarije ove tehno-ekonomske analize. U nastavku slijedi prikaz te izračun proizvodnje FN elektrane promatranog kućanstva.



Slika 5.10. Prikaz proizvodnje FN elektrane 2 kW za karakteristični ljetni tjedan

Na slici 5.10. prikazana je satna proizvodnja FN elektrane instalirane snage 2 kW promatranog kućanstva za karakteristični ljetni tjedan. Najveća proizvodnja električne energije zabilježena je 1. srpnja u 11:00 te je iznosila 1752,32 Wh



Slika 5.11. Prikaz proizvodnje FN elektrane 2 kW za karakteristični zimski tjedan

Na slici 5.11. prikazana je proizvodnja FN elektrane 2 kW za karakteristični zimski tjedan. Najveća proizvodnja električne energije zabilježena je 6. siječnja u 11:00 te je iznosila 1652,00 Wh .

U nastavku slijedi izračun te prikaz proizvodnje FN elektrane na mjesečnoj razini.

Temperatura FN ćelije se računa prema izrazu 5-3.

$$T_{\text{ćel}} = T_{\text{okoline}} + \left(\frac{NOCT - 20}{0,8} \right) \cdot G \quad (5-3)$$

Gdje je:

- $T_{\text{ćel}}$ [°C] – Temperatura FN ćelije
- T_{okoline} [°C] – Temperatura okoline
- $NOCT$ [°C] – Nominalna radna temperatura ćelije
- G [kW/m²] – Sunčevo zračenje.

Proizvodnja električne energije FN modula se računa prema izrazu 5-4.

$$P_{\text{mod}} = (G \cdot A \cdot \eta_m) \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{100} \right) \cdot (T_{\text{ćel}} - 25) \quad (5-4)$$

Gdje je:

- P_{mod} [W]– Izlazna snaga FN modula
- G [W/m²] – Sunčevo zračenje
- A [m²] – Površina FN modula
- η_M [%] – Učinkovitost FN modula
- γ [%/°C] – Temperaturni koeficijent snage
- $T_{\acute{c}el}$ [°C]– Temperatura FN ćelije.

Prema izrazima 5-3 i 5-4, proizvodnja FN modula Bisol BMO-250 Wp na datum 1. travnja u 13:00 iznosi:

$$T_{\acute{c}el} = T_{okoline} + \left(\frac{NOCT - 20}{0,8} \right) \cdot G = 8,4 + \left(\frac{44 - 20}{0,8} \right) \cdot 0,58606 = 25,98 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} P_{mod} &= (G \cdot A \cdot \eta_m) \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{100} \right) \cdot (T_{\acute{c}el} - 25) \\ &= (586,06 \cdot 1,649 \cdot 0,991 \cdot 0,153) \cdot \left(1 - \frac{0,37}{100} \right) \cdot (25,98 - 25) = 145,99 \text{ W} \end{aligned}$$

Nakon dobivene proizvedene snage jednog modula, moguće je izračunati proizvedenu snagu cijele FN elektrane. Proizvedena snaga FN elektrane računa se kao:

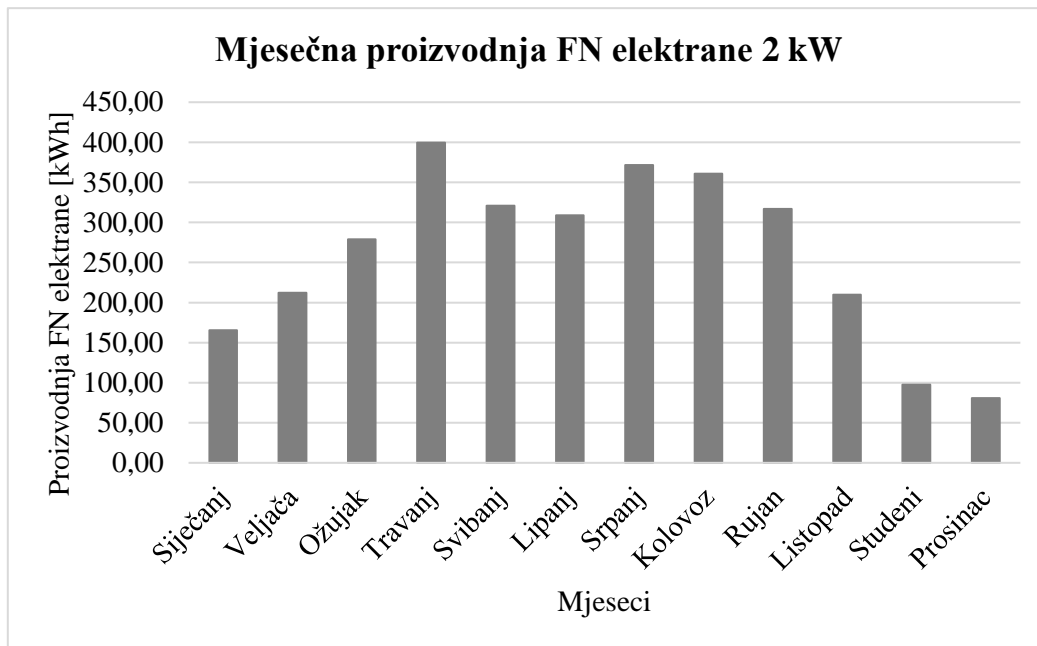
$$P_{EL} = P_{mod} \cdot n \quad (5-5)$$

Gdje je:

- P_{EL} [W]– Izlazna snaga FN elektrane
- P_{mod} [W]– Izlazna snaga FN modula
- n – Broj FN modula.

Prema izrazu 5-5, proizvedena snaga FN elektrane 2 kW promatranog kućanstva na datum 1. travnja u 13:00 iznosi:

$$P_{EL} = P_{mod} \cdot n = 145,99 \cdot 8 = 1167,99 \text{ W}$$



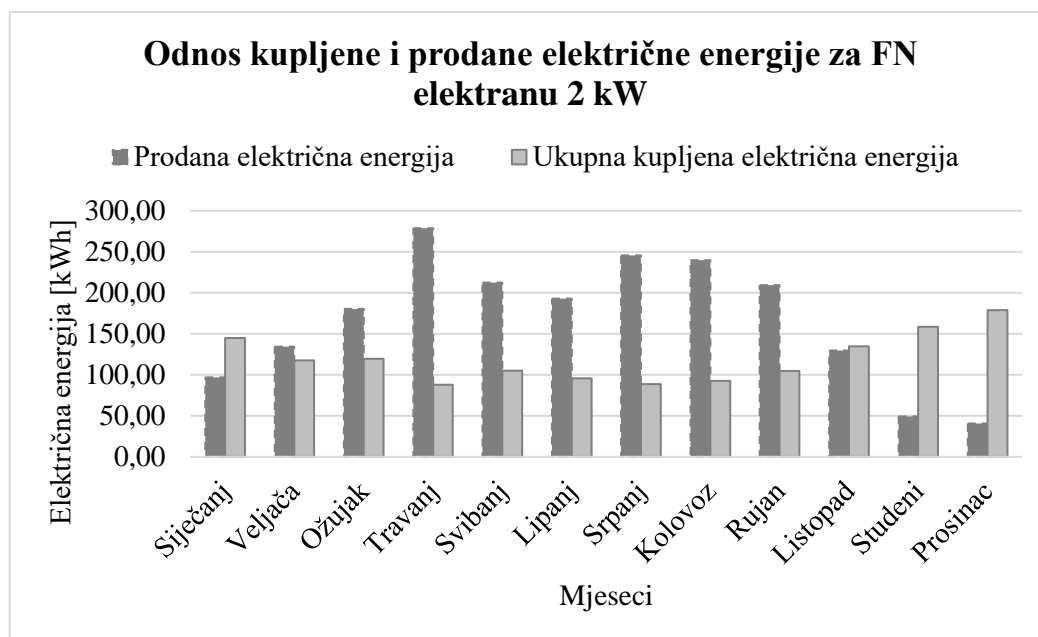
Slika 5.12. Prikaz mjesečne proizvodnje FN elektrane 2 kW

Na slici 5.12. prikazana je proizvodnja električne energije promatranog kućanstva za svaki mjesec u godini. Najveća proizvodnja električne energije zabilježena je u travnju te je iznosila 399,70 kWh, dok je najniža proizvodnja električne energije zabilježena u prosincu te je iznosila 80,94 kWh. Ukupna godišnja proizvodnja se dobije kao zbroj proizvodnje u svim mjesecima te iznosi 3123,29 kWh.

U nastavku slijedi objašnjenje viška odnosno manjka električne energije te prodane električne energije.

Višak električne energije u ovoj tehno-ekonomskoj analizi se računao kao razlika između proizvedene električne energije od strane FN elektrane i potrošnje kućanstva. U ovoj analizi izračun se radio za svaki sat u godini. Ukoliko je potrošnja kućanstva veća nego li proizvodnja iz FN elektrane, taj iznos se klasificirao kao manjak električne energije te je on preuzet iz mreže. Dok se u slučaju veće proizvodnje u odnosu na potrošnju klasificirao kao višak te se on predavao u mrežu. Stoga broj prodanih kWh električne energije u mrežu je jednak višku električne energije. Manjak električne energije se kupovao iz mreže prema bijelom tarifnom modelu, stoga je manjak električne energije prikazan kao kupljena električna energija u višoj i nižoj tarifi. Ukupna kupljena električna energija dobivena je zbrojem kupljene električne energije u višoj i nižoj tarifi.

U nastavku slijedi prikaz kupljene i prodane električne energije na mjesečnoj razini za promatrano kućanstvo.



Slika 5.13. Prikaz odnosa kupljene i prodane električne energije za FN elektranu 2 kW

Na slici 5.13. prikazan je odnos između kupljene i prodane električne energije u slučaju integrirane FN elektrane za promatrano kućanstvo. Zaključuje se da je u većem dijelu godine prodana električna energija u mrežu iz FN elektrane veća od kupljene električne energije iz mreže. Stoga se zaključuje da je FN elektrana 2 kW zadovoljava veći dio potreba za električnom energijom promatranog kućanstva.

Budući da se promatrano kućanstvo klasificira kao kupac s vlastitom proizvodnjom, izračun mjesečnih troškova radi se prema pravilima koje je propisao HEP ODS za sva kućanstva koji imaju navedeni status.

U nastavku slijedi prikaz izračuna troškova te zarade promatranog kućanstva za travanj.

$$PKCi = \frac{(E_{VT} \cdot C_{VT}) + (E_{NT} \cdot C_{NT})}{E_{VT} + E_{NT}} \quad (5-6)$$

Gdje je :

- $PKCi$ [€/kWh]– Prosječna jedinična cijena električne energije bez naknada i poreza
- E_{VT} [kWh]– Potrošena električna energija u višoj tarifi
- C_{VT} [€/kWh]– Prodajna cijena električne energije u višoj tarifi
- E_{NT} [kWh] – Potrošena električna energija u nižoj tarifi

- C_{NT} [€/kWh] – Prodajna cijena električne energije u nižoj tarifi.

Izraz 5-6 opisuje izračun prosječne jedinične cijene električne energije bez uračunatih naknada i poreza koji se označava kao PKCi. PKCi se koristi za izračun cijene koju kućanstvo dobiva od strane HEP ODS-a za predanu električnu energiju u mrežu

Izračun PKCi za travanj u slučaju FN elektrane 2 kW:

$$PKCi = \frac{(E_{VT} \cdot C_{VT}) + (E_{NT} \cdot C_{NT})}{E_{VT} + E_{NT}} = \frac{(58,37 \cdot 0,07489) + (29,66 \cdot 0,036697)}{58,37 + 29,66}$$

$$= 0,0620 \text{ €/kWh}$$

U svim mjesecima PKCi iznosi oko 0,06 €.

Izračun prodajne cijene električne energije u mrežu računa se u dva slučaja te ovisi je li kućanstvo tijekom mjeseca predalo više električne energije u mrežu nego uzelo iz mreže. Stoga se prodajna cijena električne energije računa prema izrazima 5-7 i 5-8.

$$Ci = 0,9 \cdot PKCi \quad (5-7)$$

Uz uvjet: $E_{pi} \geq E_{ii}$

Gdje je:

- C_i [€/kWh] – Cijena prodane električne energije [€/kWh]
- $PKCi$ [€/kWh] – Prosječna jedinična cijena električne energije bez naknada i poreza
- E_{pi} [€/kWh] – Ukupna električna energija preuzeta iz mreže unutar obračunskog razdoblja
- E_{ii} [kWh] – Ukupna električna energija isporučena u mrežu unutar obračunskog razdoblja.

$$Ci = 0,9 \cdot PKCi \cdot \frac{E_{pi}}{E_{ii}} \quad (5-8)$$

Uz uvjet: $E_{pi} \leq E_{ii}$

Prema navedenome, za mjesec travanj u promatranome kućanstvu cijena prodane električne energije se računa kao:

$$E_{pi} \leq E_{ii} ; 88,03 \leq 278,84$$

$$C_i = 0,9 \cdot PKC_i \cdot \frac{E_{pi}}{E_{ii}} = 0,9 \cdot 0,061955 \cdot \frac{88,03}{278,84} = 0,0176 \text{ €/kWh}$$

Prodajna cijena električne energije za travanj promatranog kućanstva iznosi 0,0176 €/kWh, budući da je ukupna električna energija preuzeta iz mreže manja od ukupne električne energije isporučene u mrežu.

Tablica 5.3. Cijena prodane električne energije po mjesecima za FN elektranu 2 kW

Mjesec	Ci [€/kWh]
Siječanj	0,0558
Veljača	0,0477
Ožujak	0,0360
Travanj	0,0176
Svibanj	0,0283
Lipanj	0,0285
Srpanj	0,0202
Kolovoz	0,0216
Rujan	0,0282
Listopad	0,0566
Studeni	0,0573
Prosinac	0,0578

U tablici 5.3. prikazana je jedinična cijena prodane električne energije po mjesecima za promatranu kućanstvo s integriranom FN elektranom 2 kW. U daljnjoj analizi sve prikazane C_i se odnose na jediničnu cijenu prodane električne energije. Cijena prodane električne energije se kreće između 0,02 € i 0,05 €. Razlog niske prodajne cijene u ljetnim mjesecima je količina prodane električne energije u navedenim mjesecima što je vidljivo na slici 5.13.

Zarada od predane električne energije u mrežu se računa kao:

$$Zarada = E_{ii} \cdot C_i \tag{5-9}$$

Gdje je:

- *Zarada* [€] – Zarada od prodane električne energije u mrežu
- E_{ii} [kWh] – Ukupna električna energija isporučena u mrežu unutar obračunskog razdoblja
- C_i [€/kWh] - Cijena prodane električne energije.

$$Zarada = E_{ii} \cdot C_i = 278,87 \cdot 0,017604 = 4,91 \text{ €}$$

Promatrano kućanstvo je u travnju zaradilo 4,91 od isporuke električne energije u mrežu.

Trošak za električnu energiju se računa prema izrazu 5-1 te za mjesec travanj iznose 10,31 €.

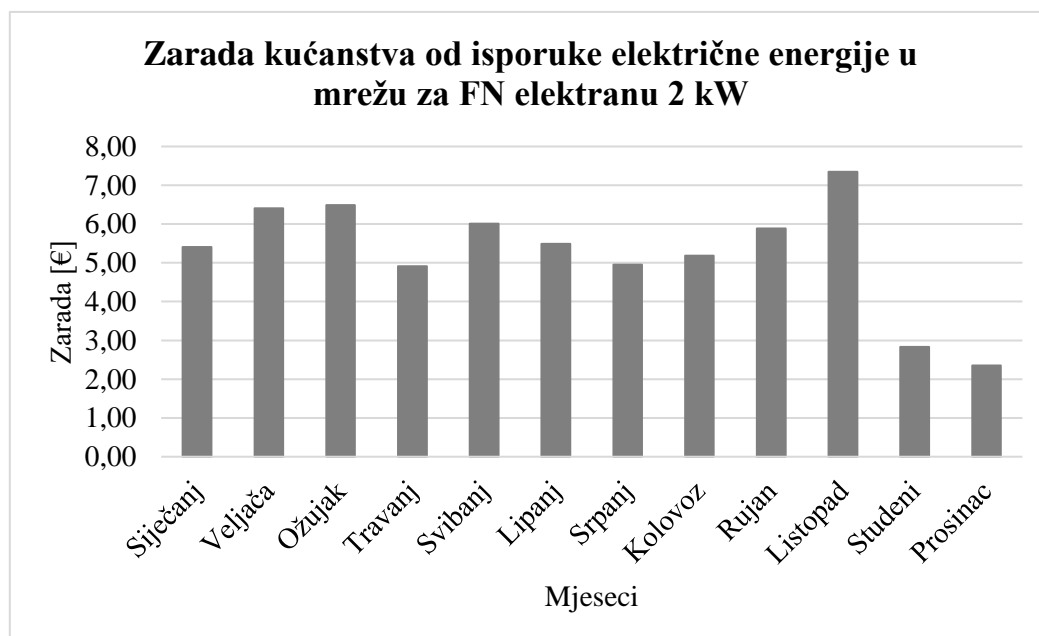
Ukupni troškovi električne energije za mjesec travanj kod kupaca s vlastitom proizvodnjom računaju se kao nadopuna izraza 5-2:

$$Ukupni\ troškovi = (Troškovi + N_{OMM} + N_o - Zarada) \cdot (1 + PDV) \quad (5-10)$$

$$\begin{aligned} Ukupni\ troškovi &= (Troškovi + N_{OMM} + N_o - Zarada) \cdot (1 + PDV) \\ &= (10,31 + 0,982 + 1,54 - 4,91) \cdot 1,13 = 8,95 \text{ €} \end{aligned}$$

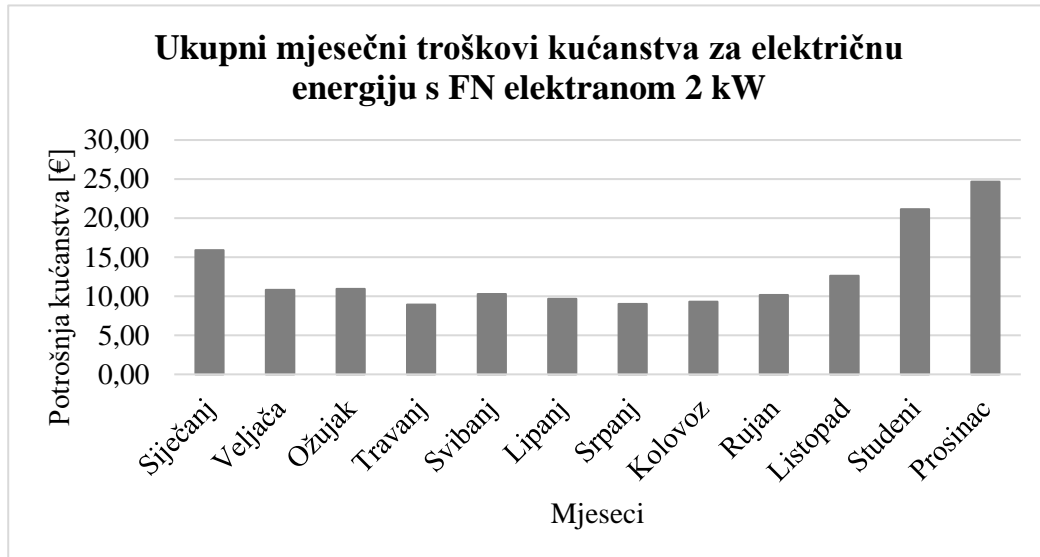
Promatrano kućanstvo će za mjesec travanj platiti račun za električnu energiju u iznosu od 8,95 €.

U nastavku slijedi prikaz ukupnih mjesečnih troškova te zarade za promatrano kućanstvo.



Slika 5.14. Prikaz zarade kućanstva od isporuke električne energije u mrežu za FN elektranu 2 kW

Na slici 5.14. prikazana je zarada promatranog kućanstva od isporuke električne energije u mrežu u promatranom operativnom scenariju u kojemu je integrirana FN elektrana snage 2 kW. Najveća zarada je zabilježena u listopadu te je iznosila 7,34 € dok je najmanja zarada zabilježena u prosincu te je iznosila 2,35 €. Naglašava se da prikazana zarada služi za umanjivanje ukupnog mjesečnog računa za električnu energiju.



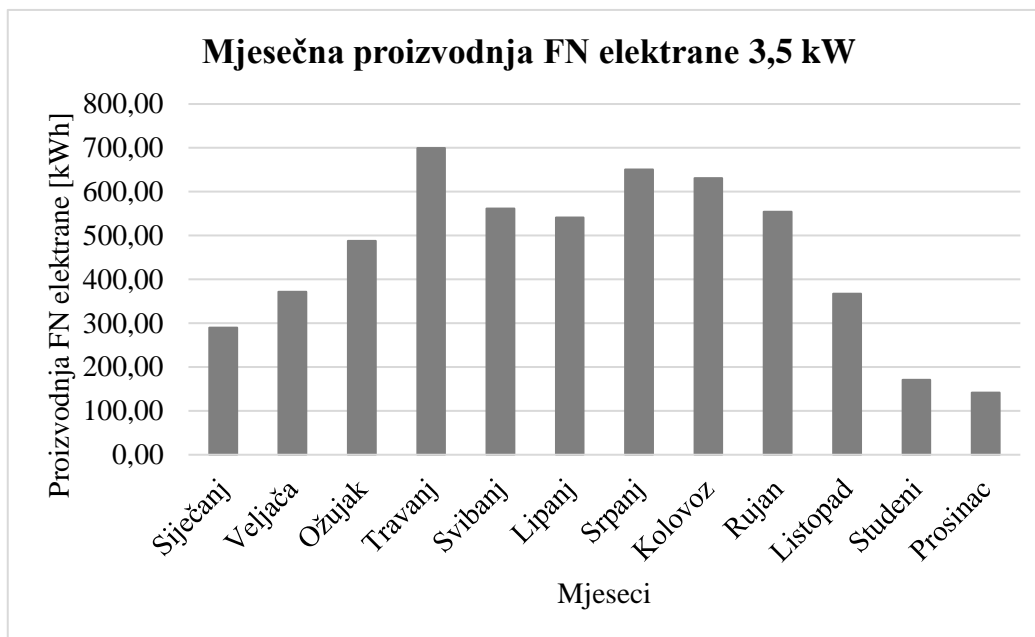
Slika 5.15. Prikaz ukupnih mjesečnih troškova za električnu energiju s FN elektranom 2 kW

Na slici 5.15. prikazani su ukupni mjesečni troškovi za električnu energiju promatranoga kućanstva s integriranom FN elektranom instalirane snage 2 kW. Najmanji troškovi su zabilježeni u travnju te iznose 8,95 € dok su najveći troškovi zabilježeni u prosincu te iznose 24,67 €. Ukupni godišnji troškovi za električnu energiju promatranoga kućanstva u promatranom operativnom scenariju se dobiju kao zbroj svih ukupnih mjesečnih troškova te iznose 153,52 € što je značajno manje od osnovnog operativnog scenarija bez integracije FN elektrane i baterijskog sustava pohrane u kojemu su ukupni godišnji troškovi kućanstva za električnu energiju iznosili 389,63 €. Svi navedeni podaci izračunati su pomoću izraza 5-10.

5.3.2. Kućanstvo s FN elektranom instalirane snage 3,5 kW

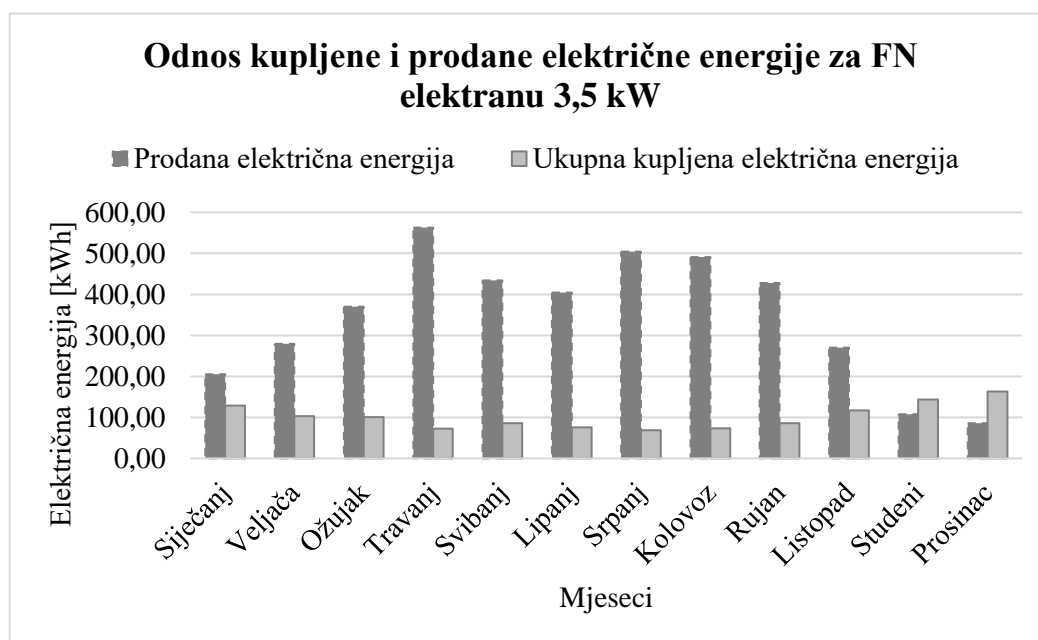
U ovome operativnom scenariju promatrano kućanstvo ima integriranu FN elektranu instalirane snage 3,5 kW. Kao i u prošlom promatranom operativnom scenariju, koriste se identični FN moduli te su svi izračuni napravljeni prema izrazima iz prošlog operativnog scenarija. U ovome operativnom scenariju bit će prikazani isključivo rezultati na razini mjeseca i godine. Bit će prikazana mjesečna proizvodnja FN elektrane, prikaz odnosa između kupljene i prodane električne energije po mjesecima i Ci za sve mjesece te prikazi zarade kućanstva od isporuke električne

energije u mrežu i konačno ukupni mjesečni troškovi promatranog kućanstva za električnu energiju.



Slika 5.16. Prikaz mjesečne proizvodnje FN elektrane 3,5 kW

Na slici 5.16. prikazana je proizvodnja FN elektrane 3,5 kW promatranog kućanstva po mjesecima. Za izračun su se koristili izrazi 5-4 i 5-5. Kao i u prethodnom operativnom scenariju, najveća proizvodnja električne energije je zabilježena u travnju te je iznosila 699,47 kWh, dok je najmanja proizvodnja električne energije zabilježena u prosincu te je iznosila 141,64 kWh.



Slika 5.17. Prikaz odnosa kupljene i prodane električne energije za FN elektranu 3,5 kW

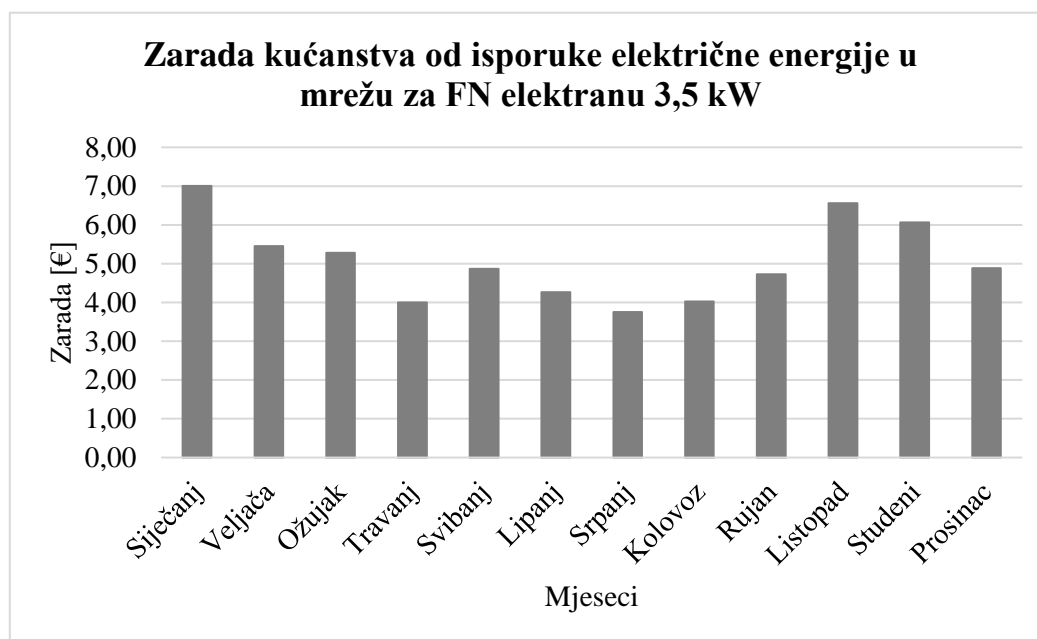
Na slici 5.17. prikazan je odnos između kupljene i prodane električne energije za FN elektranu 3,5 kW. Kućanstvo u svim mjesecima osim studenog i prosinca preda u mrežu više električne energije nego što preuzima iz mreže. Zaključuje se da FN elektrana instalirane snage 3,5 kW zadovoljava u značajnom dijelu potrebe za električnom energijom promatranog kućanstva.

Tablica 5.4. Cijena prodane električne energije po mjesecima za FN elektranu 3,5 kW

Mjesec	Ci [€/kWh]
Siječanj	0,0342
Veljača	0,0195
Ožujak	0,0142
Travanj	0,0071
Svibanj	0,0112
Lipanj	0,0106
Srpanj	0,0075
Kolovoz	0,0082
Rujan	0,0110
Listopad	0,0243
Studen	0,0564
Prosinac	0,0578

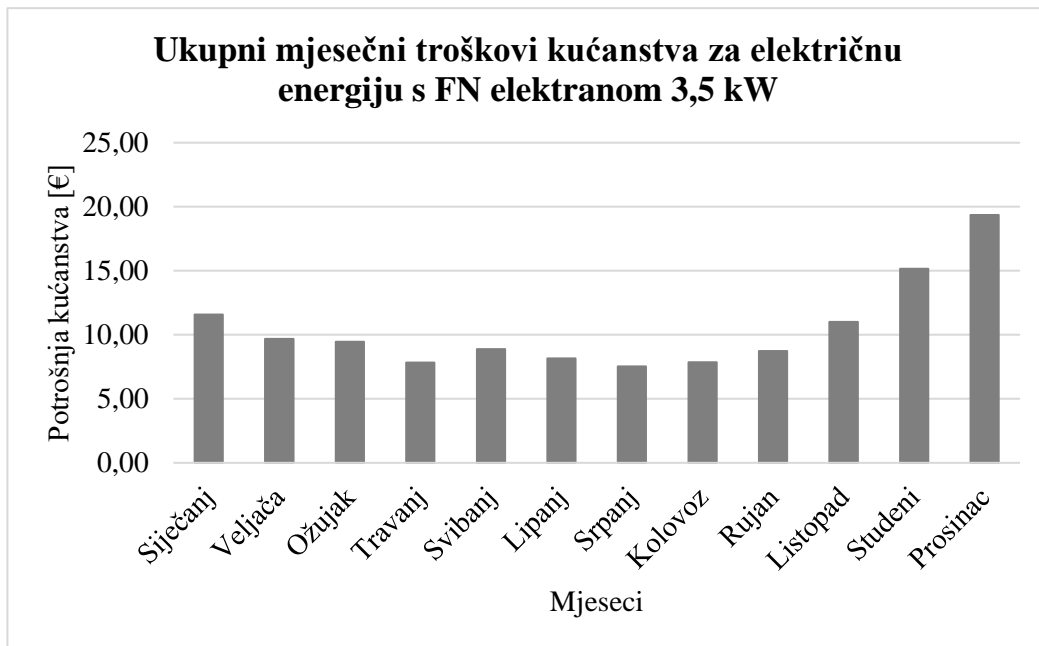
U tablici 5.4. prikazana je jedinična cijena prodane električne energije po mjesecima za kućanstvo s integriranom FN elektranom snage 3,5 kW. Izračun je napravljen pomoću izraza 5-7 i 5-8. Najmanje cijene prodane električne energije dobivene su za travanj, srpanj te kolovoz, budući da je u tim mjesecima najveća razlika između isporučene električne energije u mrežu i preuzete električne energije iz mreže što je vidljivo i na slici 5.17., a prema izrazu 5-8 cijena prodane električne energije pada s većom vrijednosti isporučene električne energije u mrežu. Iz svega navedenoga se zaključuje da je FN elektranu potrebno dimenzionirati za zadovoljenje potreba za

električnom energijom kućanstva, no ne za stvaranje viškova električne energije u mreži ukoliko je kućanstvo registrirano kao kupac s vlastitom proizvodnjom.



Slika 5.18. Prikaz zarade kućanstva od isporuke električne energije u mrežu za FN elektranu 3,5 kW

Na slici 5.18. prikazana je zarada promatranog kućanstva od isporuke električne energije u mrežu. Zarada je izračunata prema izrazu 5-9. Najveća zarada je zabilježena u siječnju te iznosi 7,01 €, dok je najmanja zarada zabilježena u srpnju te iznosi 3,76 €. U usporedbi s operativnim scenarijom u kojemu je kućanstvo imalo FN elektranu instalirane snage 2 kW, zarada je manja u ovome operativnom scenariju. Razlog je veća predaja električne energije u mrežu od preuzimanja iz mreže te se prema izrazu 5-7 u tome slučaju sa povećanjem predane električne energije u mrežu smanjuje cijena prodaje električne energije za kupca s vlastitom proizvodnjom. Navedeni model je napravljen kako bi potaknuo kućanstva da dimenzioniraju FN elektrane za pokrivanje vlastitih potreba za električnom energijom te kako bi se spriječilo predimenzioniranje FN elektrana u kućanstvima budući da viškovi električne energije koji se isporučuju u mrežu stvaraju uzlazne tokove snaga te povećavaju napon u mreži.



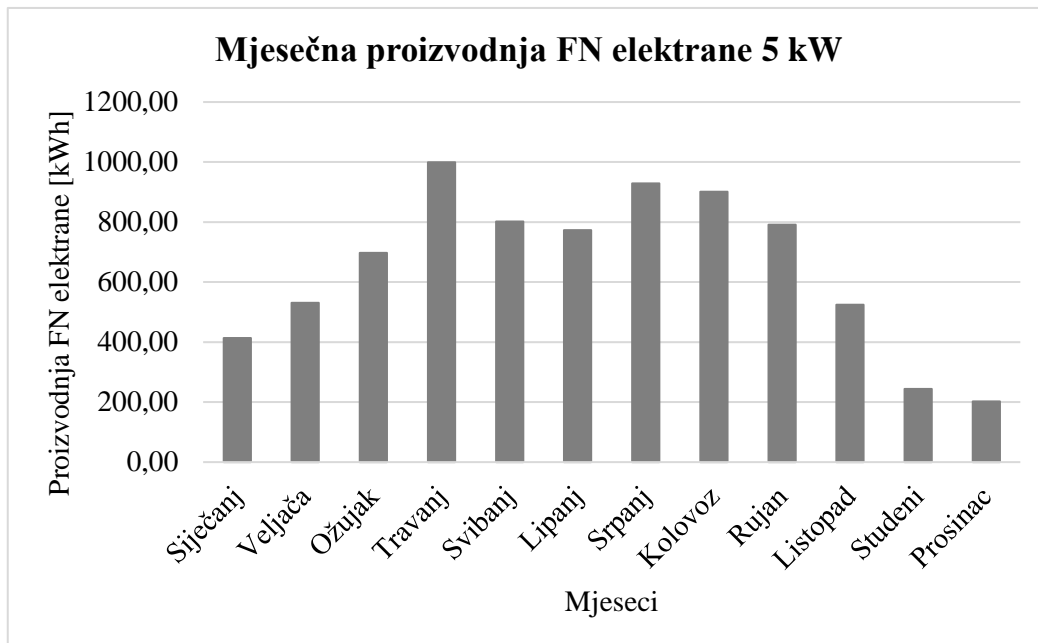
Slika 5.19. Ukupni mjesečni troškovi kućanstva za električnu energiju s FN elektranom 3,5 kW

Na slici 5.19. prikazani su ukupni mjesečni troškovi promatranog kućanstva za električnu energiju s integriranom FN elektranom snage 3,5 kW. Ukupni mjesečni troškovi su izračunati prema izrazu 5-10. Najveći ukupni mjesečni troškovi su zabilježeni u prosincu te iznose 19,35 €, dok su najmanji ukupni mjesečni troškovi zabilježeni u srpnju te iznose 7,53 €. Ukupni godišnji troškovi za električnu energiju promatranog kućanstva se dobiju zbrojem ukupnih mjesečnih troškova te iznose 125,24 €, što je značajno manje nego u osnovnom operativnom scenariju kućanstva bez integrirane FN elektrane i baterijskog sustava pohrane gdje su ukupni godišnji troškovi iznosili 389,63 €. U operativnom scenariju kućanstva s integriranom FN elektranom snage 2 kW ukupni godišnji troškovi su iznosili 178,75 €. Zaključuje se s obzirom na veću instaliranu snagu FN elektrane 3,5 kW, ukupni godišnji troškovi nisu značajno pali u odnosu na FN elektranu instalirane snage 2 kW.

5.3.3. Kućanstvo s FN elektranom instalirane snage 5 kW

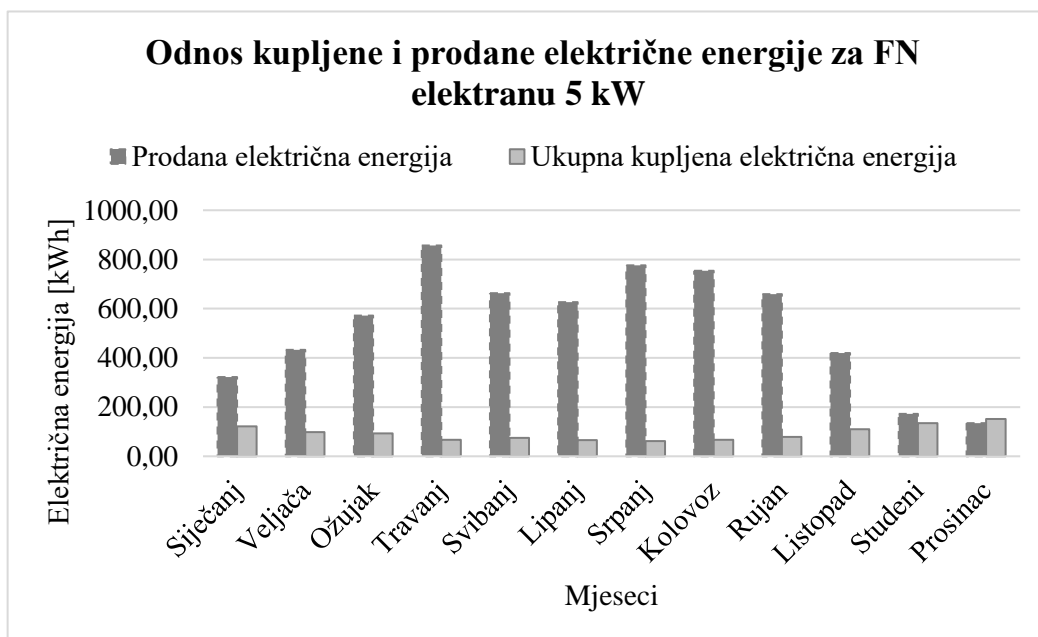
U ovome operativnom scenariju promatrano kućanstvo ima integriranu FN elektranu instalirane snage 5 kW. Kao i u prošlom promatranom operativnom scenariju, koriste se identični FN moduli te su svi izračuni napravljeni prema izrazima iz operativnog scenarija u kojemu je integrirana FN elektrana instalirane snage 2 kW u promatrano kućanstvo. U ovome operativnom scenariju bit će

prikazani isključivo rezultati na razini mjeseca i godine. Bit će prikazana mjesečna proizvodnja FN elektrane, prikaz odnosa između kupljene i prodane električne energije po mjesecima i Ci za sve mjesece te prikazi zarade kućanstva od isporuke električne energije u mrežu i konačno ukupni mjesečni troškovi promatranog kućanstva za električnu energiju.



Slika 5.20. Prikaz mjesečne proizvodnje FN elektrane 5 kW

Na slici 5.20. prikazana je proizvodnja električne energije iz FN elektrane 5 kW promatranog kućanstva. Zaključuje se da je profil proizvodnje identičan kao i u operativnim scenarijima s integriranim FN elektranama snage 2 kW i 3,5 kW. Najveća proizvodnja električne energije zabilježena je u travnju te iznosi 999,25 kWh, dok je najmanja proizvodnja električne energije zabilježena u prosincu te iznosi 202,35 kWh. Prikazana proizvodnja je izračunata pomoću izraza 5-4 i 5-5.



Slika 5.21. Prikaz odnosa kupljene i prodane električne energije za FN elektranu 5 kW

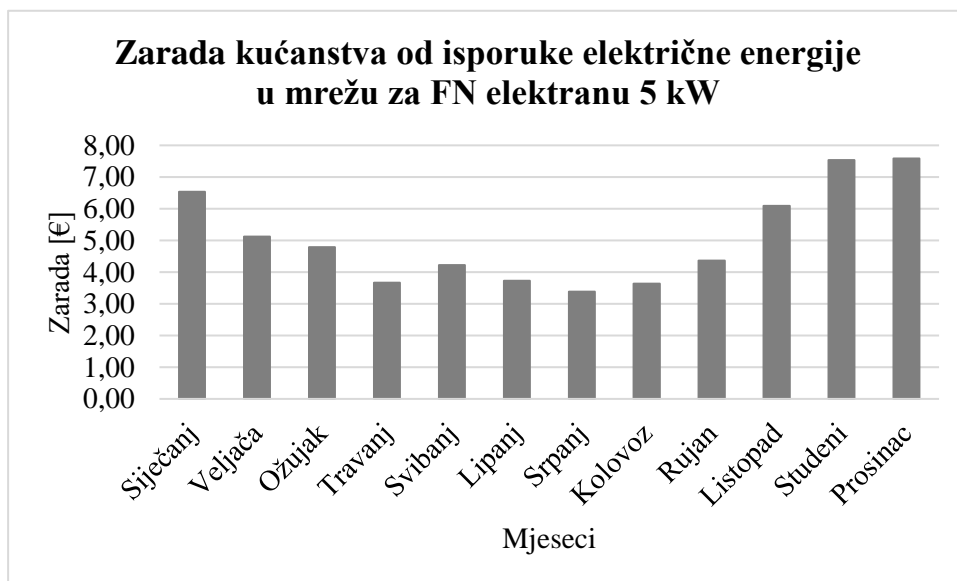
Na slici 5.21. prikazan je odnos između kupljene i prodane električne energije u mrežu za FN elektranu 5 kW. Iz slike 5.21. je vidljivo da samo u prosincu promatrano kućanstvo preuzima iz mreže veću količinu električne energije nego što isporuči u mrežu. Zaključuje se da FN elektrana zadovoljava značajni dio potreba kućanstva za električnom energijom, no također se zaključuje da FN elektrana 5 kW isporučuje u mrežu u većem dijelu godine puno više nego što kućanstvo preuzme iz mreže. Sukladno tome, smanjivati će se cijena prodane električne energije C_i . Jedno od rješenja za navedeno smanjenje cijene prodane električne energije je integriranje baterijskog sustava pohrane električne energije koji bi koristio višak proizvedene električne energije iz FN elektrane te tako doprinosa smanjenju isporuke električne energije u mrežu te smanjio negativni utjecaj navedenoga na mrežu u vidu povećanih napona u mreži.

Tablica 5.5. Cijena prodane električne energije po mjesecima za FN elektranu 5 kW

Mjesec	Ci [€/kWh]
Siječanj	0,0342
Veljača	0,0195
Ožujak	0,0142
Travanj	0,0071
Svibanj	0,0112

Lipanj	0,0106
Srpanj	0,0075
Kolovoz	0,0082
Rujan	0,0110
Listopad	0,0243
Studeni	0,0564
Prosinac	0,0578

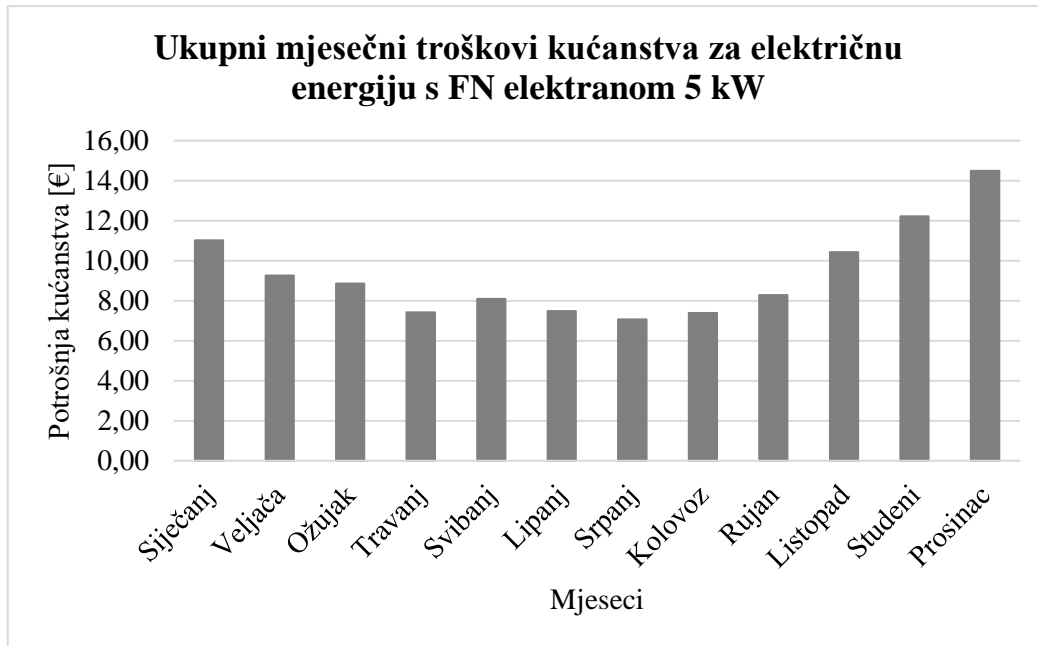
U tablici 5.5. prikazana je jedinična cijena prodane električne energije po mjesecima za kućanstvo s integriranom FN elektranom snage 5 kW. Izračun je napravljen pomoću izraza 5-7 i 5-8. Najmanje cijene prodane električne energije dobivene su za travanj, srpanj te kolovoz, budući da je u tim mjesecima najveća razlika između isporučene električne energije u mrežu i preuzete električne energije iz mreže što je i vidljivo na slici 5.21., a prema izrazu 5-8 cijena prodane električne energije pada s većom vrijednosti isporučene električne energije u mrežu.



Slika 5.22. Prikaz zarade kućanstva od isporuke električne energije u mrežu za FN elektranu 5 kW

Na slici 5.22. prikazana je zarada kućanstva od isporuke električne energije promatranog kućanstva u mrežu za FN elektranu 5 kW. Zarada je izračunata prema izrazu 5-9. Najveća zarada je zabilježena u prosincu te iznosi 7,58 €, dok je najmanja zarada zabilježena u srpnju te iznosi

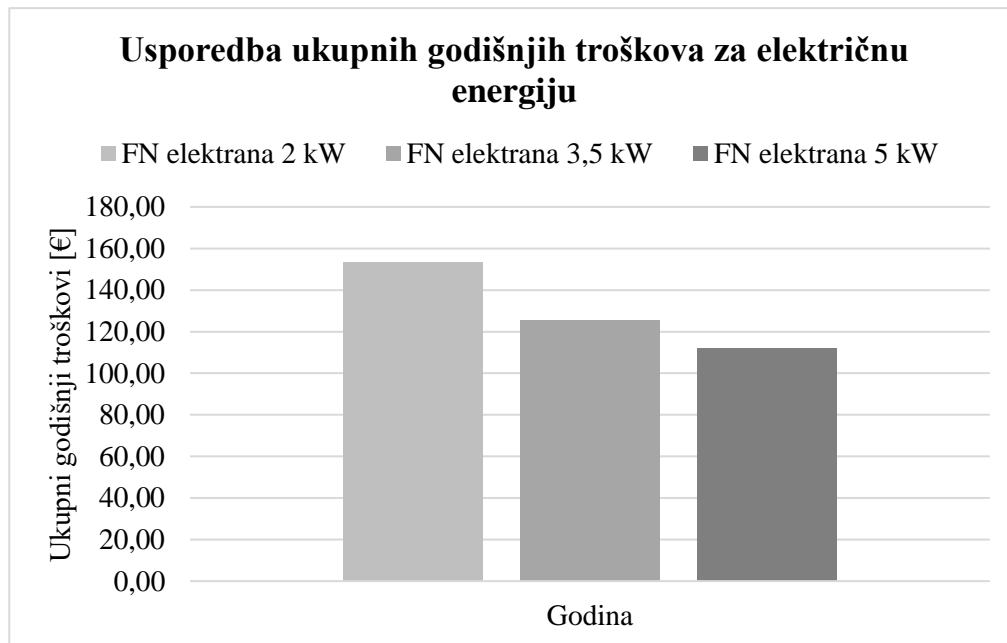
3,39 €. U usporedbi s operativnim scenarijom u kojemu je kućanstvo imalo FN elektranu instalirane snage 2 kW i 3,5 kW, zarada je manja u ovome operativnom scenariju. Ukupna godišnja zarada za promatrani operativni scenarij iznosi 60,63 €, dok je za FN elektranu 2 kW ukupna godišnja zarada iznosila 63,26 € dok je za FN elektranu 3,5 kW ukupna godišnja zarada iznosila 60,88 €. Razlog je veća predaja električne energije u mrežu od preuzimanja iz mreže te se prema izrazu 5-8 u tome slučaju sa povećanjem predane električne energije u mrežu smanjuje cijena prodaje električne energije za kupca s vlastitom proizvodnjom.



Slika 5.23. Prikaz ukupnih mjesečnih troškova kućanstva za električnu energiju s FN elektranom 5 kW

Na slici 5.23. prikazani su ukupni mjesečni troškovi promatranog kućanstva s integriranom FN elektranom 5 kW. Prikazani troškovi su izračunati prema izrazu 5-10. Najveći ukupni mjesečni troškovi su zabilježeni u prosincu te iznose 14,49 €, dok su najmanji ukupni mjesečni troškovi zabilježeni u srpnju te iznose 7,07 €. Ukupni godišnji troškovi dobiju se kao zbroj svih ukupnih mjesečnih troškova te iznose 111,98 €. U usporedbi s prethodnim operativnim scenarijima u kojima ukupni godišnji troškovi iznose za osnovni operativni scenarij bez FN elektrane i baterijskog sustava pohrane 389,63 €, za operativni scenarij s integriranom FN elektranom snage 2 kW ukupni godišnji troškovi iznose 153,52 € te za operativni scenarij s integriranom FN elektranom 3,5 kW ukupni godišnji troškovi iznose 125,24 €. Zaključuje se da integracija FN elektrane značajno smanjuje troškove za električnu energiju promatranog kućanstva, no zaključuje

se da je FN elektrana 5 kW predimenzionirana za promatrano kućanstvo budući da su ukupni godišnji troškovi u odnosu na FN elektranu 3,5 kW smanje samo za 13,26 €. Iz svega navedenog se zaključuje da je primjerena integracija FN elektrane za promatrano kućanstvo instalirane snage 3,5 kW.



Slika 5.24. Prikaz usporedbe ukupnih godišnjih troškova za električnu energiju promatranog kućanstva

Na slici 5.24. prikazana je usporedba ukupnih godišnjih troškova promatranog kućanstva za električnu energiju za tri različite snage FN elektrane. Najveći ukupni godišnji troškovi se javljaju za FN elektranu 2 kW te iznose 153,52 €, dok su najmanji troškovi za FN elektranu 5 kW te iznose 111,98 €.

5.4. Operativni scenariji – kućanstvo s FN elektranom i baterijskim sustavom pohrane električne energije

U ovome potpoglavlju bit će prikazana tehno-ekonomska analiza operativnih scenarija promatranog kućanstva s integriranom FN elektranom i baterijskim sustavom pohrane električne energije. Bit će prikazani tehničke karakteristike korištenih baterijskih sustava pohrane, dok su FN moduli identični kao i u prethodno prikazanim operativnim scenarijima. Cilj integracije baterijskih

sustava pohrane električne energije u kućanstva je smanjiti isporuku viškova proizvodnje električne energije iz FN elektrane, te povećati zadovoljenje potreba kućanstva za električnom energijom.

U nastavku slijedi prikaz glavnih karakteristika korištenih baterijskih sustava pohrane za potrebu tehno-ekonomske analize.

Tablica 5.6. Glavne karakteristike korištenih baterijskih sustava pohrane [34] [35] [36] [37] [41] [42]

Karakteristike baterije	Vrste korištenih baterijskih sustava pohrane			
	<i>Varta pulse neo 6,5/6,9 kWh</i>	Huawei Luna 2000-5-S0 (5kWh)	Tesla Powerwall 3 (13,5 kWh)	Panasonic Evervolt EV-X10 (10 kWh)
Maksimalni kapacitet [Wh]	6500	5000	13500	10000
Minimalni kapacitet [Wh]	5900	5000	13500	9000
Maksimalna snaga punjenja [W]	2500	2500	5000	5500
Maksimalna snaga pražnjenja [W]	2300	2500	11500	6190
Učinkovitost punjenja [%]	100	100	100	100
Učinkovitost pražnjenja [%]	85	86	89	90
Početno stanje [Wh]	650	500	1350	1000
Cijena [€]	4990,00	3103,90	8700,00	Cijena dostupna isključivo na upit

U tablici 5.6. prikazane su glavne karakteristike korištenih baterijskih sustava pohrane električne energije za potrebu izrade tehno-ekonomske analize. Korištene su baterije različitih proizvođača, različitog kapaciteta pohrane električne energije kako bi se utvrdilo koliki kapacitet baterijskog sustava pohrane električne energije je potreban promatranom kućanstvu. Analizirati će se primjena svih navedenih baterijskih sustava pohrane zajedno s FN elektranama instaliranih snaga koje su

već prethodno analizirane, te će se donijeti zaključci o periodu povrata investicije u baterijske sustave pohrane za sve kombinacije FN elektrana i baterijskih sustava pohrane.

Baterijski sustav pohrane u promatranom kućanstvo modeliran je na način da se je početno stanje napunjenosti baterijskog sustava pohrane električne energije iznosi 10 % ukupnog kapaciteta baterijskog sustava pohrane, te se baterijski sustav pohrane puni kada se na FN elektrani javi višak proizvodnje električne energije. Ukoliko je baterijski sustav pohrane u potpunosti napunjen, tada će se eventualni višak proizvedene električne energije isporučiti u mrežu. U razdobljima kada promatrano kućanstvo troši više električne energije nego što FN elektrana proizvodi, tada će taj manjak pokriti baterijski sustav pohrane električne energije. Ukoliko stanje napunjenosti baterije dođe do 10 % ukupnog kapaciteta baterijskog sustava pohrane, tada će se eventualni manjak električne energije preuzeti iz mreže.

5.4.1. Kućanstvo s FN elektranom instalirane snage 2 kW i baterijskim sustavom pohrane električne energije

U ovome operativnom scenariju pretpostavlja se da promatrano kućanstvo ima integriranu FN elektranu instalirane snage 2 kW te će se promatrati utjecaj integracije različitih baterijskih sustava pohrane električne energije. Bit će prikazan izračun trenutnog (satnog) kapaciteta baterijskog sustava pohrane te izračun trenutnog (satnog) stanja napunjenosti baterije. Također prikazati će se snaga punjenja i pražnjenja za karakteristični ljetni i zimski dan te stanje napunjenosti baterijskog sustava pohrane za karakteristični ljetni i zimski dan. Svi navedeni izračuni i prikazi bit će prikazani isključivo u ovome operativnom scenariju, za ostale operativne scenarije bit će prikazane i uspoređene mjesečne vrijednosti. U svim operativnim scenarijima prikazati će se odnos između kupljene i prodane električne energije u mrežu, tablica s C_i te ukupni mjesečni troškovi promatranog kućanstva za navedeni operativni scenarij. Zaključno će biti prikazan period povrata investicije baterijskog sustava pohrane električne energije za koje je to moguće izračunati.

Trenutni kapacitet baterijskog sustava pohrane se računa kao:

$$C_{bat} = C_{i-1} + \frac{P_{chi} \cdot \eta_{ch}}{1000} - \frac{P_{dch}}{1000 \cdot \eta_{dch}} \quad (5-11)$$

Gdje je:

- C_{bat} [kWh] – Trenutni kapacitet baterije
- C_{i-1} [kWh] – Kapacitet baterije u prethodnom satu
- P_{chi} [W] – Snaga punjenja baterije
- P_{dch} [W] – Snaga pražnjenja baterije
- η_{ch} – Učinkovitost punjenja
- η_{dch} – Učinkovitost pražnjenja.

U nastavku slijedi izračun kapaciteta baterijskog sustava pohrane za datum 1. travanj u 20:00 ukoliko se koristi baterijski sustav pohrane *Varta pulse neo* 6,5/5,9 kWh.

$$C_{bat} = C_{i-1} + \frac{P_{chi} \cdot \eta_{ch}}{1000} - \frac{P_{dch}}{1000 \cdot \eta_{dch}} = 5,64 + \frac{0 \cdot 1}{1000} - \frac{272,69}{1000 \cdot 0,85} = 5,32 \text{ kWh}$$

Analogno prikazanom proračunu, u svim kombinacijama FN elektrane svih promatranih instaliranih snaga i svih baterijskih sustava pohrane, izračunati su svi satni trenutni kapaciteti baterijskog sustava pohrane u godini prema izrazu 5-11.

$$SOC_{bat} = \frac{C_{bat}}{C_{max}} \cdot 100\% \quad (5-12)$$

Gdje je:

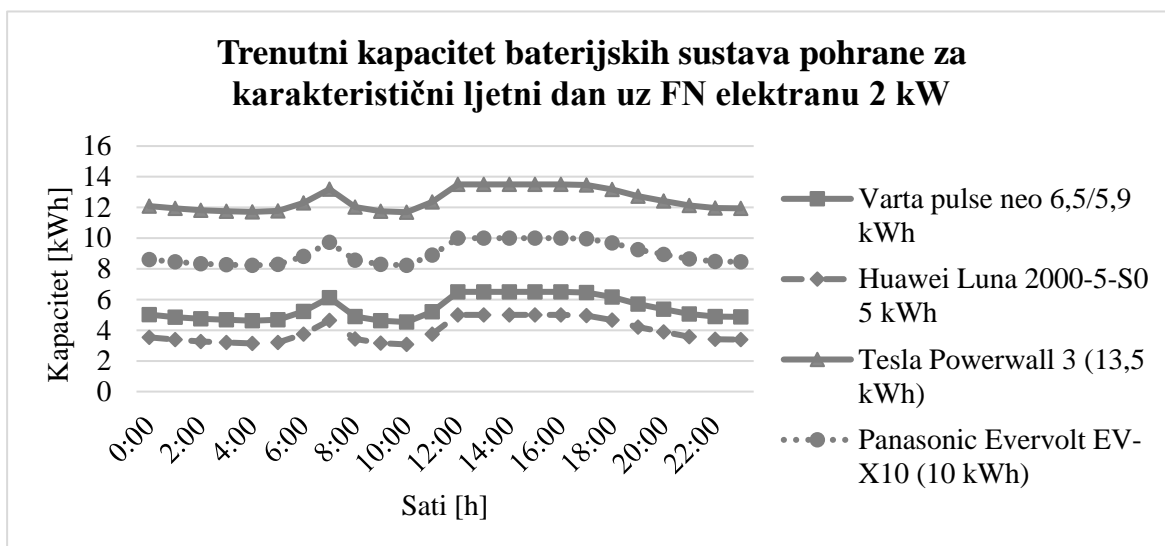
- SOC_{bat} [%] – Trenutno stanje napunjenosti baterije
- C_{bat} [kWh] – Trenutni kapacitet baterije
- C_{max} [kWh] – Maksimalni kapacitet baterije.

U nastavku slijedi izračun trenutnog stanja napunjenosti baterijskog sustava pohrane za datum 1. travanj u 20:00 ukoliko se koristi baterijski sustav pohrane *Varta pulse neo* 6,5/5,9 kWh.

$$SOC_{bat} = \frac{C_{bat}}{C_{max}} \cdot 100\% = \frac{5,32}{6,50} \cdot 100\% = 81,78 \%$$

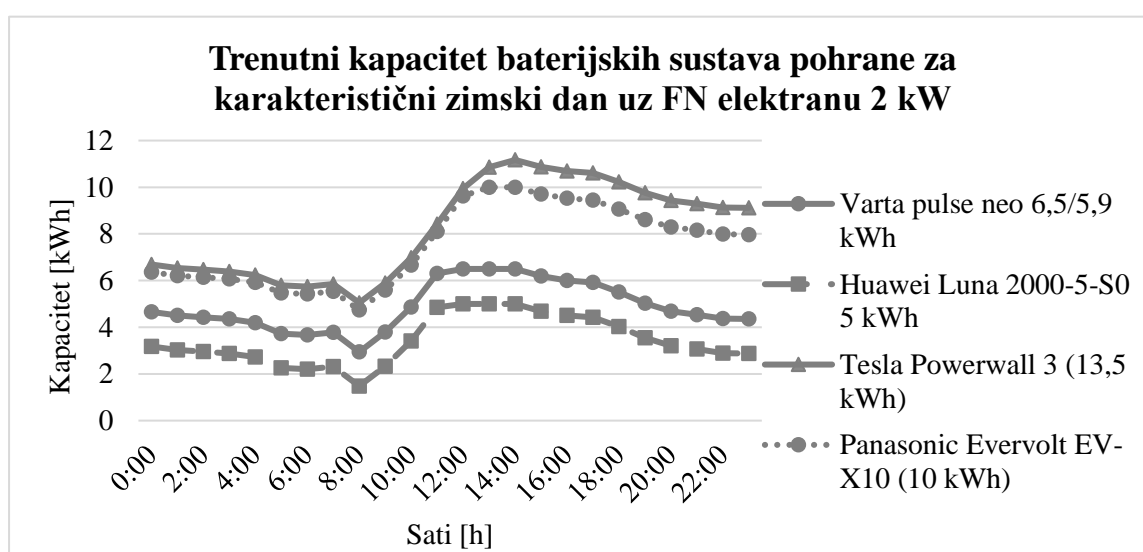
Analogno prikazanom proračunu, u svim kombinacijama FN elektrane svih promatranih instaliranih snaga i svih baterijskih sustava pohrane, izračunate su sve satne vrijednosti trenutnog stanja napunjenosti baterijskog sustava pohrane električne energije pomoću izraza 5-12.

U nastavku slijedi prikaz kapaciteta svih korištenih baterijskih sustava uz FN elektranu 2 kW za karakteristični ljetni i zimski dan. Karakteristični ljetni dan je 2. srpanj, dok je karakteristični zimski dan 2. siječanj.



Slika 5.25. Prikaz trenutnog kapaciteta baterijskih sustava pohrane za karakteristični ljetni dan uz FN elektranu 2 kW

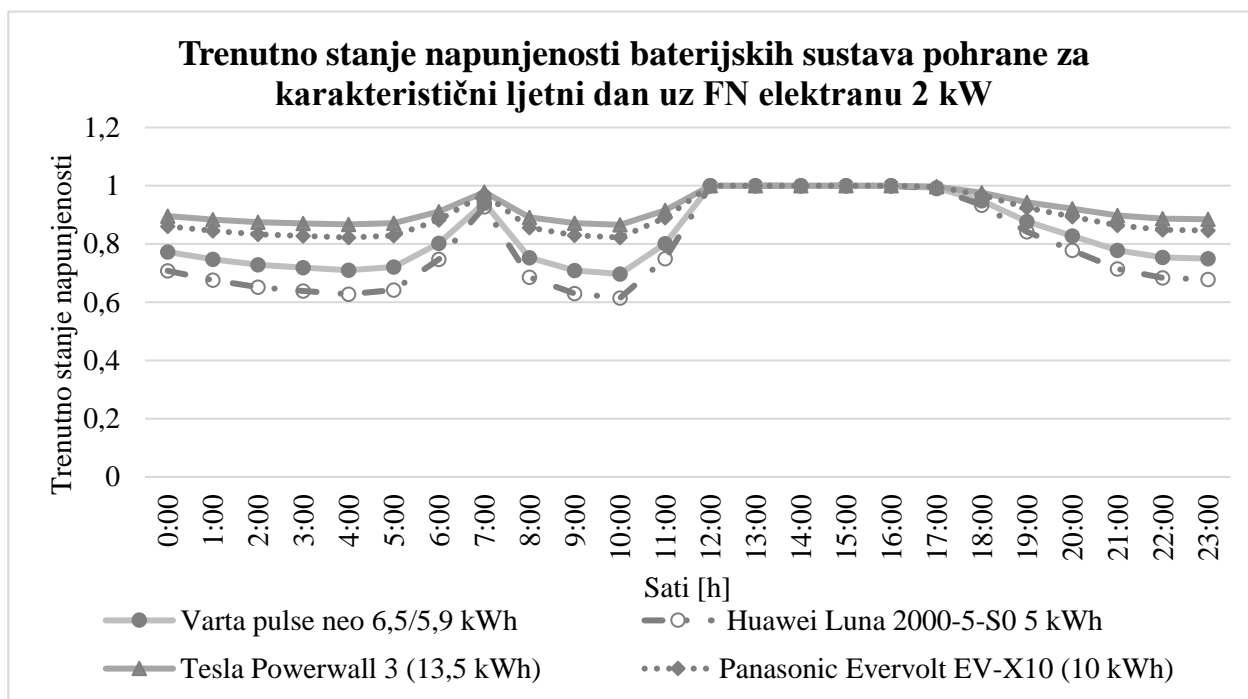
Na slici 5.25. prikazani su trenutni kapaciteti svih promatranih baterijskih sustava pohrane električne energije za karakteristični ljetni dan. Iz slike 5.25. je vidljivo da se svi baterijski sustavi pohrane ponašaju isto u svim satima tijekom promatranog dana. Zaključuje se da se baterijski sustavi pohrane uglavnom prazne tijekom noćnih sati dok se pune tijekom dana kada FN elektrana proizvodi najviše električne energije. Tijekom karakterističnog ljetnog dana svi promatrani baterijski sustavi u popodnevnim satima imaju trenutno stanje napunjenosti 100 %, što znači da se tada višak električne energije iz FN elektrane nema gdje pohraniti nego se isporučuje u mrežu. Sve vrijednosti su izračunate pomoću izraza 5-11.



Slika 5.26. Prikaz trenutnog kapaciteta baterijskih sustava pohrane za karakteristični zimski dan uz FN elektranu 2 kW

Na slici 5.26. prikazani su trenutni kapaciteti svih promatranih baterijskih sustava pohrane električne energije za karakteristični zimski dan. Svi promatrani baterijski sustavi pohrane se ponašaju isto što je i očekivano budući da punjenje ili pražnjenje baterijskih sustava pohrane određuje proizvodnja FN elektrane i potrošnja promatranog kućanstva. Baterijski sustavi pohrane električne energije se pune tijekom dnevnih sati kada FN elektrana proizvodi električnu energiju, dok se prazni u noćnim satima kada FN elektrana ne proizvodi električnu energiju. Sve vrijednosti su izračunate pomoću izraza 5-11.

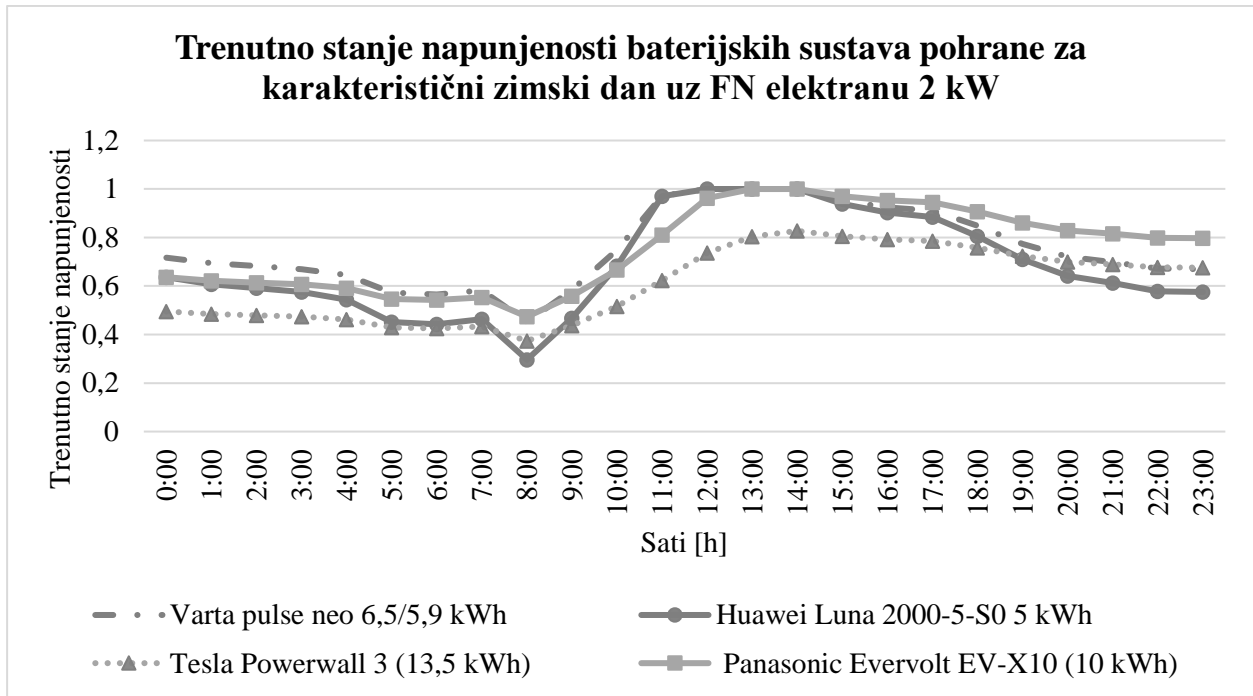
U nastavku slijedi prikaz trenutnog stanja napunjenosti svih promatranih baterijskih sustava pohrane električne energije za karakteristični ljetni i zimski dan.



Slika 5.27. Prikaz trenutnog stanja napunjenosti baterijskih sustava pohrane električne energije za karakteristični ljetni dan uz FN elektranu 2 kW

Na slici 5.27. prikazano je trenutno stanje napunjenosti svih baterijskih sustava pohrane električne energije za karakteristični ljetni dan uz FN elektranu 2 kW. Prikazane podatke je potrebno pomnožiti sa 100 da bi se dobio postotak. Zaključuje se da se svi baterijski sustavi pohrane ponašaju identično budući da stanje napunjenosti ovisi o potrošnji promatranog kućanstva i proizvodnji FN elektrane. Također se zaključuje da tijekom karakterističnog ljetnog dana stanje napunjenosti svih baterijskih sustava pohrane električne energije iznosi 100 % tijekom

popodnevnih sati, odnosno tada se električna energija proizvedena iz FN elektrane isporučuje u mrežu. Sve vrijednosti su izračunate pomoću izraza 5-12.



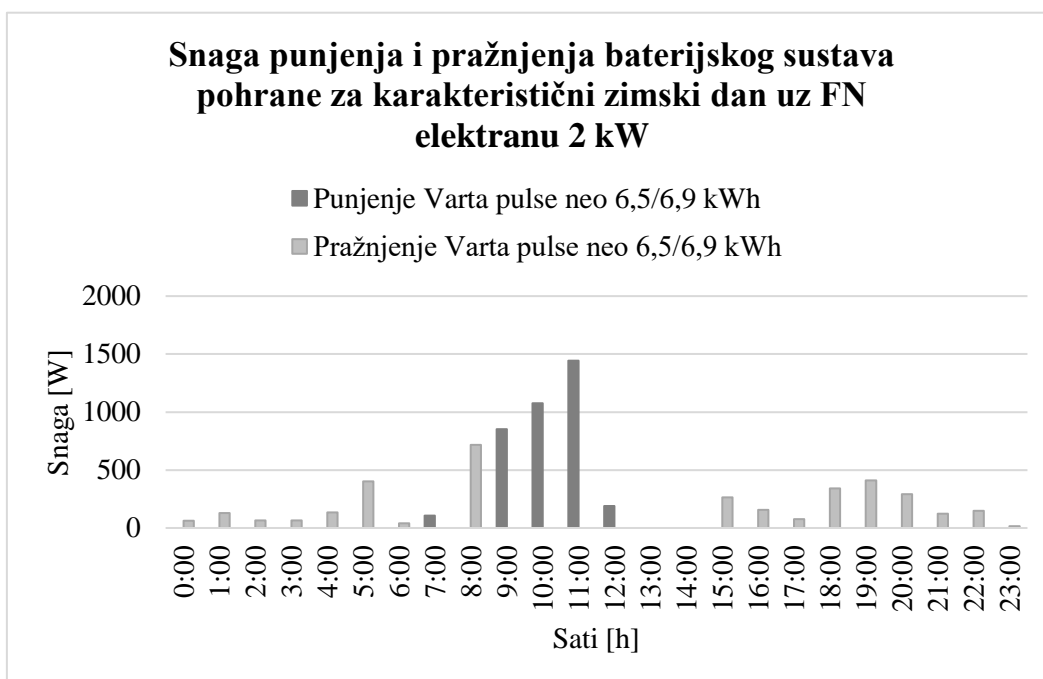
Slika 5.28. Prikaz trenutnog stanja napunjenosti baterijskih sustava pohrane za karakteristični zimski dan uz FN elektranu 2 kW

Na slici 5.28. prikazano je trenutno stanje napunjenosti svih promatranih baterijskih sustava pohrane za karakteristični zimski dan uz FN elektranu 2 kW. Kao i u slučaju karakterističnog ljetnog dana svi promatrani baterijski sustavi pohrane se ponašaju isto, odnosno baterijski sustavi pohrane električne energije se pune tijekom dnevnih sati kada FN elektrana proizvodi električnu energiju te se prazni u noćnim satima kada FN elektrana ne proizvodi električnu energiju.

U nastavku će biti prikazana snaga punjenja i pražnjenja *Varta pulse neo* 6,5/6,9 kWh za karakteristični ljetni i zimski dan. Navedene karakteristike se ne prikazuju za ostale promatrane baterijske sustave budući da se vrijednosti snage punjenja odnosno pražnjenja minimalno razlikuju. Snaga punjenja i pražnjenja se izražava kao :

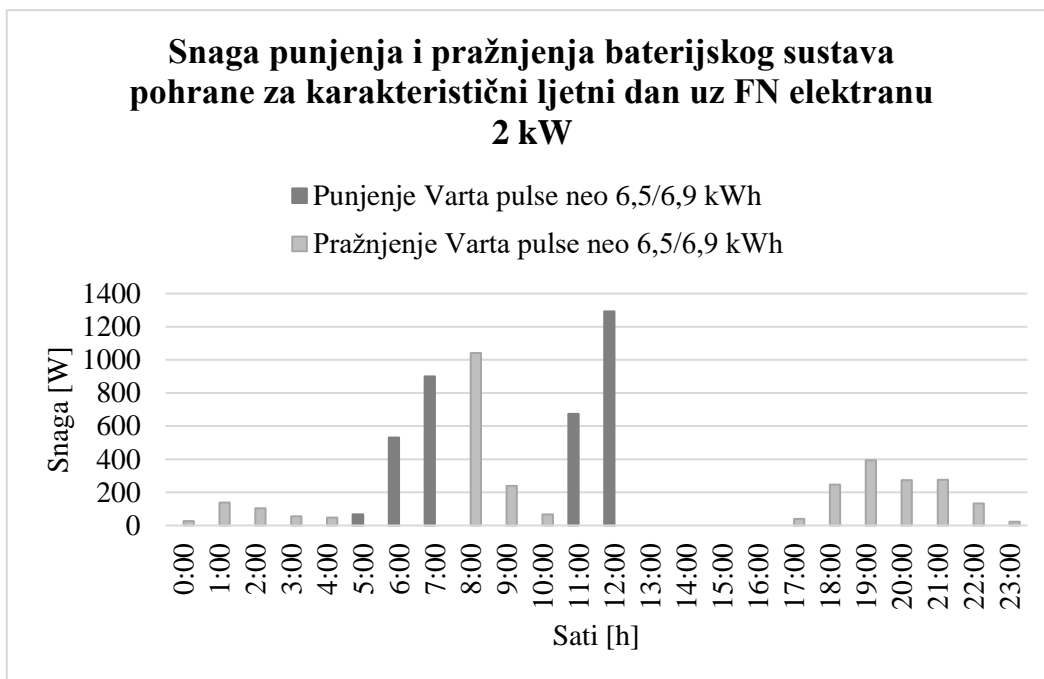
- Snaga punjenja = Višak proizvedene električne energije iz FN elektrane
- Snaga pražnjenja = Manjak proizvodnje električne energije za zadovoljavanje potreba kućanstva za električnom energijom

Svi prikazani podaci su izračunati pomoću izraza 5-12.



Slika 5.29. Prikaz snage punjenja i pražnjenja baterijskog sustava Varta pulse neo 6,5/6,9 kWh za karakteristični zimski dan uz FN elektranu 2 kW

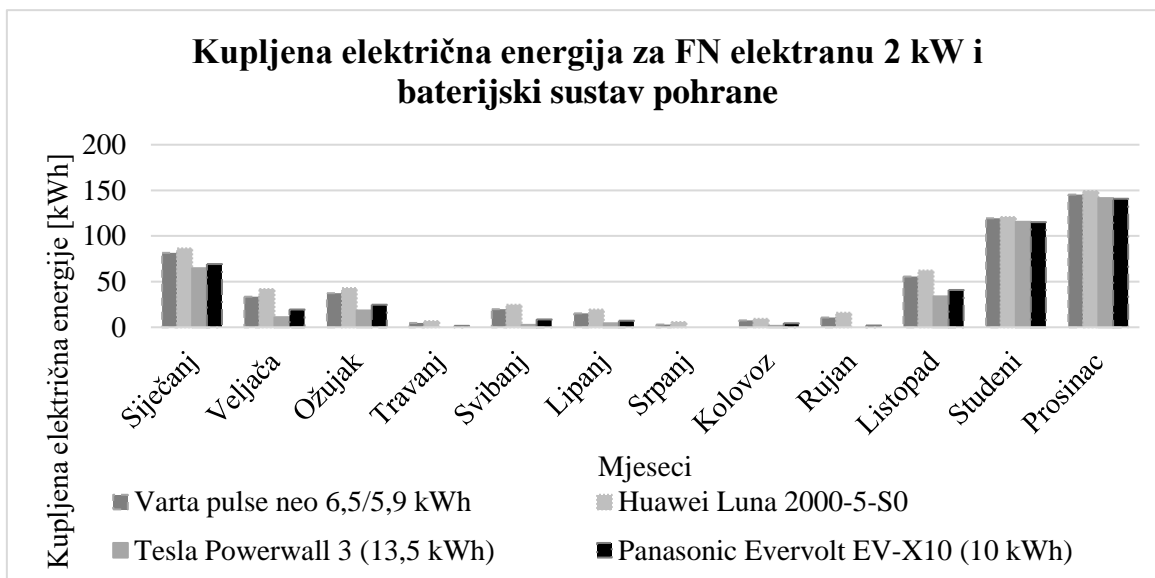
Na slici 5.29. prikazana je snaga punjenja i pražnjenja baterijskog sustava *Varta pulse neo 6,5/6,9 kWh* za karakteristični zimski dan uz FN elektranu 2 kW. Zaključuje se da se tijekom zimskog vremena baterija u većem dijelu dana prazni, dok se u dijelovima dana kada ima najviše sunčevog zračenja puni budući da tada FN elektrana ima najveću proizvodnju električne energije. Snaga punjenja je u zimskome razdoblju značajno većeg jediničnog iznosa nego li snaga pražnjenja. Najveća vrijednost snage punjenja iznosi 1443,27 W, dok najveća snaga pražnjenja iznosi 718,09 W.



Slika 5.30. Prikaz snage punjenja i pražnjenja baterijskog sustava Varta pulse neo 6,5/6,9 kWh za karakteristični ljetni dan uz FN elektranu 2 kW

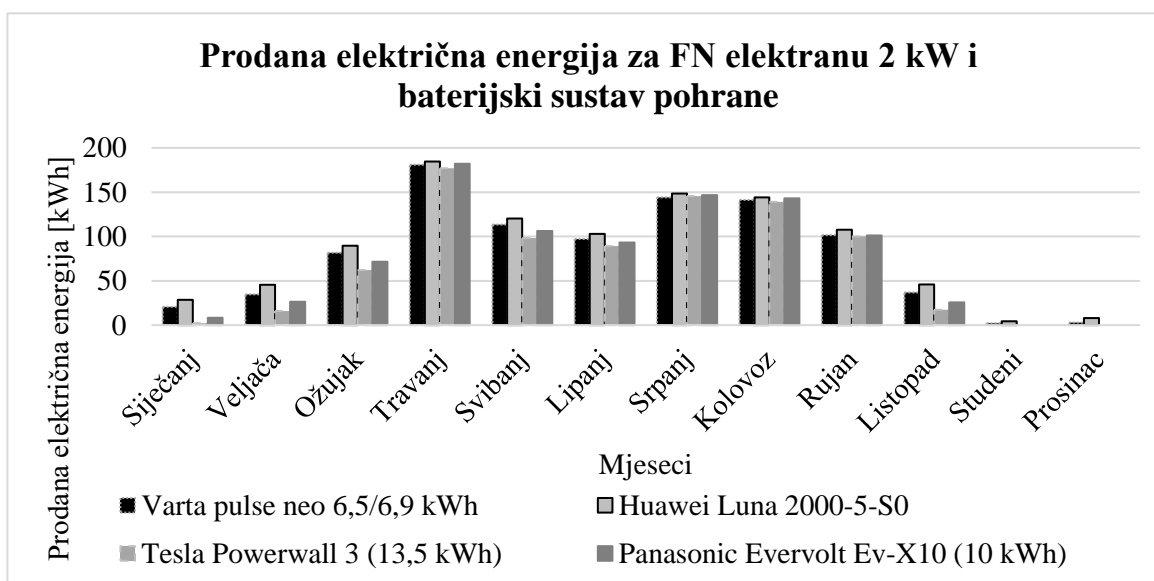
Na slici 5.30. prikazana je snaga punjenja i pražnjenja baterijskog sustava *Varta pulse neo 6,5/6,9 kWh* za karakteristični ljetni dan uz FN elektranu 2 kW. Najveća snaga punjenja iznosi 1293,06 W, dok najveća snaga pražnjenja iznosi 1040,39 W. Zaključuje se da tijekom nekoliko popodnevnih sati nije prisutna niti snaga punjenja niti snaga pražnjenja, u tom slučaju SOC baterije iznosi 100 % te postoje viškovi proizvodnje FN elektrane koji se tada isporučuju u mrežu.

U nastavku će se prikazati kupljena i prodana električna energija u mrežu za sve promatrane baterijske sustave pohrane električne energije, također će se prikazati i tablica s mjesečnom Ci za sve promatrane baterijske sustave pohrane električne energije, zarada promatranog kućanstva, ukupni mjesečni troškovi promatranog kućanstva te izračun povrata investicije promatranih baterijskih sustava pohrane električne energije.



Slika 5.31. Prikaz kupljene električne energije za FN elektranu 2 kW i baterijski sustav pohrane

Na slici 5.31. prikazana je kupljena električna energija promatranog kućanstva za FN elektranu 2 kW s integriranim baterijskim sustavom pohrane električne energije. U odnosu na operativni scenarij bez baterijskih sustava pohrane te s FN elektranom 2 kW, zaključuje se da je kupljena električna energija iz mreže značajno manja u ovome operativnom scenariju. Zaključuje se da integracija baterijskih sustava pohrane električne energije u kućanstva smanjuje kupljenu električnu energiju iz mreže.



Slika 5.32. Prikaz prodane električne energije za FN elektranu 2 kW i baterijski sustav pohrane

Na slici 5.32. prikazana je prodana električna energija u mrežu od strane promatranog kućanstva za FN elektranu 2 kW i baterijskom sustavom pohrane. U odnosu na operativni scenarij gdje je kućanstvo imalo integriranu FN elektranu 2 kW, prodana električna energija u mrežu se značajno smanjila. Razlog navedenog smanjenja je baterijski sustav pohrane električne energije koji višak proizvedene električne energije iz FN elektrane koristi za vlastito punjenje. Zaključuje se da baterijski sustavi pohrane električne energije u kućanstvima doprinose smanjenju razmjene električne energije između mreže i kućanstva, te se povećava stopa samopotrošnje proizvedene električne energije iz FN elektrane.

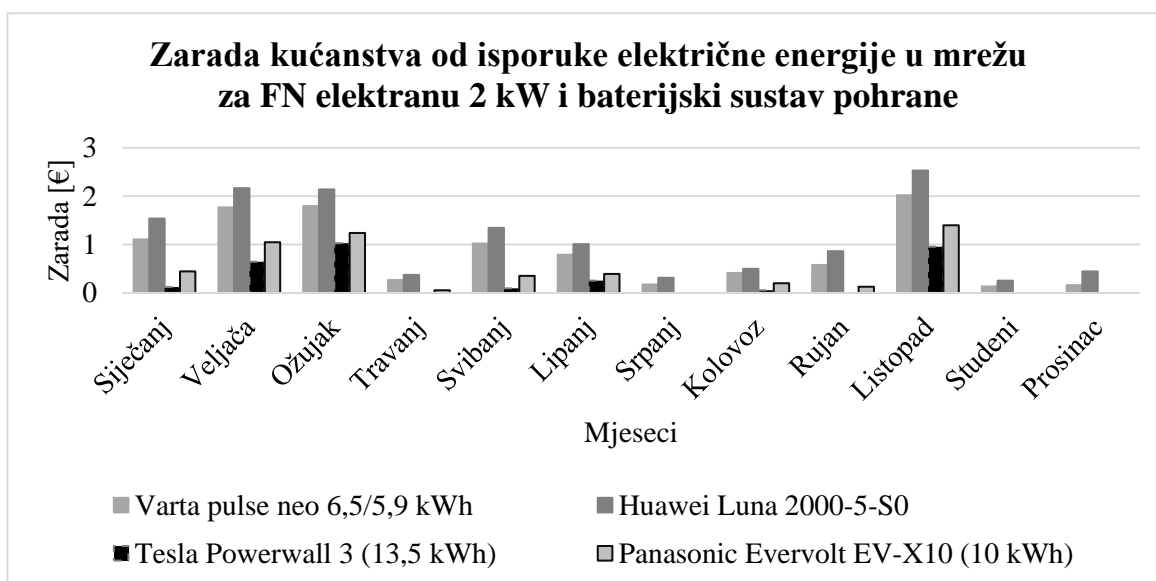
Prosječna jedinična cijena električne energije bez uračunatih naknada i poreza iznosi za baterijske sustave pohrane Varta i Huawei uglavnom 0,06 €. Dok za baterijske sustave pohrane električne energije Tesla i Panasonic se kreće između 0,04 € i 0,07 €. Za baterijski sustav pohrane *Tesla Powerwall 3* u tri mjeseca navedena cijena iznosi 0,00 € dok za *Panasonic Evervolt EV-X10* u jednom mjesecu navedena cijena iznosi 0,00 €, budući da u tim mjesecima promatrano kućanstvo nije kupovalo električnu energiju iz mreže, razlog tome je veliki kapacitet baterijskog sustava pohrane koji je opskrbljivao kućanstvo u satima u kojima nije bilo proizvodnje iz FN elektrane. Zaključuje se da veliki kapacitet baterije smanjuje jediničnu cijenu te će negativno utjecati na zaradu što će biti prikazano u nastavku ove analize. Jedinična cijena električne energije u svim slučajevima se računala prema izrazu 5-6.

Tablica 5.7. Cijena prodane električne energije po mjesecima za FN elektranu 2 kW i baterijskim sustavom pohrane

Mjesec	Ci [€/kWh]			
	<i>Varta pulse neo</i> 6,5/5,9 kWh	Huawei Luna 2000-5-S0 (5 kWh)	<i>Tesla Powerwall 3</i> (13,5 kWh)	Panasonic Evervolt EV-X10 (10 kWh)
Siječanj	0,0540	0,0542	0,0559	0,0551
Veljača	0,0507	0,0474	0,0401	0,0397
Ožujak	0,0220	0,0239	0,0165	0,0173
Travanj	0,0015	0,0020	0,0000	0,0003
Svibanj	0,0090	0,0112	0,0010	0,0033
Lipanj	0,0082	0,0098	0,0029	0,0042

Srpanj	0,0012	0,0021	0,0000	0,0000
Kolovoz	0,0029	0,0035	0,0004	0,0014
Rujan	0,0057	0,0080	0,0000	0,0013
Listopad	0,0549	0,0553	0,0553	0,0546
Studeni	0,0570	0,0568	0,0570	0,0571
Prosinac	0,0574	0,0573	0,0571	0,0572

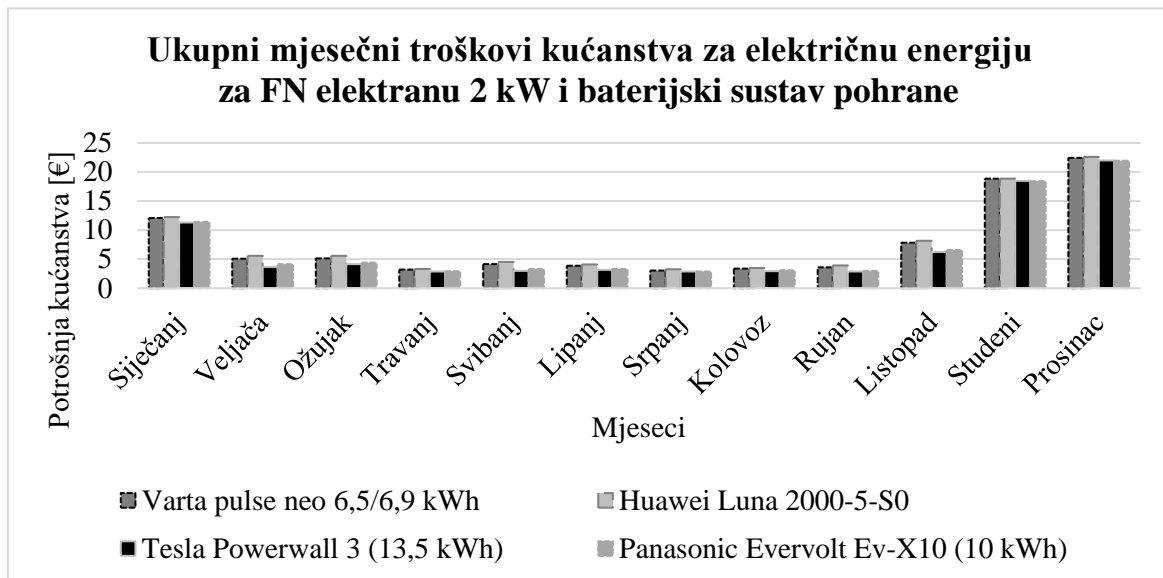
U tablici 5.7. prikazana je jedinična cijena prodane električne energije u mrežu po mjesecima za FN elektranu 2 kW i baterijskim sustavom pohrane električne energije. U usporedbi s operativnim scenarijom gdje je na promatranom kućanstvu integrirana FN elektranu 2 kW, cijena prodane električne energije je manja. Razlog tomu je baterijski sustav pohrane električne energije koji smanjuje razmjenu električne energije između kućanstva i mreže. Sve vrijednosti su izračunate pomoću izraza 5-7 i 5-8.



Slika 5.33. Prikaz zarada kućanstva od isporuke električne energije u mrežu za FN elektranu 2 kW i baterijski sustav pohrane

Na slici 5.33. prikazana je zarada kućanstva od isporuke električne energije u mrežu za FN elektranu 2 kW i baterijski sustav pohrane. Kao i kod Ci u usporedbi s operativnim scenarijom u kojemu je integrirana FN elektranu 2 kW, u ovome operativnom scenariju i zarada promatranog kućanstva je manja budući da integriranjem baterijskog sustava pohrane se smanjuje razmjena

električne energije s mrežom. Najveću zaradu postiže baterijski sustav pohrane električne energije *Huawei Luna 2000-5-S0* budući da ima i najmanji kapacitet baterije, odnosno s integracijom tog baterijskog sustava se u usporedbi s ostalima najviše električne energije razmjenjuje s mrežom. Svi izračunati podaci o zaradi su izračunati pomoću izraza 5-9.



Slika 5.34. Prikaz ukupnih mjesečnih troškova kućanstva za električnu energiju za FN elektranu 2 kW i baterijski sustav pohrane

Na slici 5.34. prikazani su ukupni mjesečni troškovi kućanstva za električnu energiju za FN elektranu 2 kW i integriranim baterijskim sustavom pohrane električne energije. Ukupni godišnji troškovi za baterijski sustav proizvođača Varta iznose 92,53 €, dok za baterijski sustav pohrane od proizvođača Huawei ukupni godišnji troškovi za električnu energiju promatranog kućanstva iznose 95,60 €. Navedeni troškovi u slučaju baterijskog sustava proizvođača Tesla iznose 83,88 €, dok za baterijski sustav pohrane proizvođača Panasonic navedeni troškovi iznose 85,46 €. Ukupni godišnji troškovi za operativni scenarij promatranog kućanstva s integriranom FN elektranom 2 kW iznose 153,52 €. Zaključuje se da integracija baterijskog sustava pohrane električne energije smanjuje ukupne godišnje troškove kućanstva za električnu energiju.

U nastavku slijedi prikaz perioda otplate investicije u promatrane baterijske sustave pohrane. Naglašava se da se neće vršiti izračun za baterijski sustav pohrane *Panasonic Evervolt EV-X10* (10 kWh) budući da cijena navedenog baterijskog sustava pohrane nije javno dostupna.

Period otplate investicije promatranih baterijskih sustava računa se kao:

$$PO_{bat} = \frac{C_{bat}}{T_{god,FN} - T_{god,bat}} \quad (5-13)$$

Gdje je:

- PO_{bat} [godine] – Period otplate investicije u baterijski sustav pohrane
- C_{bat} [€] – Investicijski troškovi za baterijski sustav pohrane
- $T_{god,FN}$ [€] – Ukupni godišnji troškovi električne energije uz FN elektranu
- $T_{god,bat}$ [€] – Ukupni godišnji troškovi uz FN elektranu i baterijski sustav pohrane.

Period otplate baterijskog sustava pohrane *Varta pulse neo 6,5/5,9 kWh* iznosi:

$$PO_{bat} = \frac{C_{bat}}{T_{god,FN} - T_{god,bat}} = \frac{4990,00}{153,52 - 92,53} = 81,82 \text{ godina}$$

Period otplate baterijskog sustava pohrane *Huawei Luna 2000-5-S0 (5 kWh)* iznosi:

$$PO_{bat} = \frac{C_{bat}}{T_{god,FN} - T_{god,bat}} = \frac{3103,90}{153,52 - 95,61} = 53,59 \text{ godina}$$

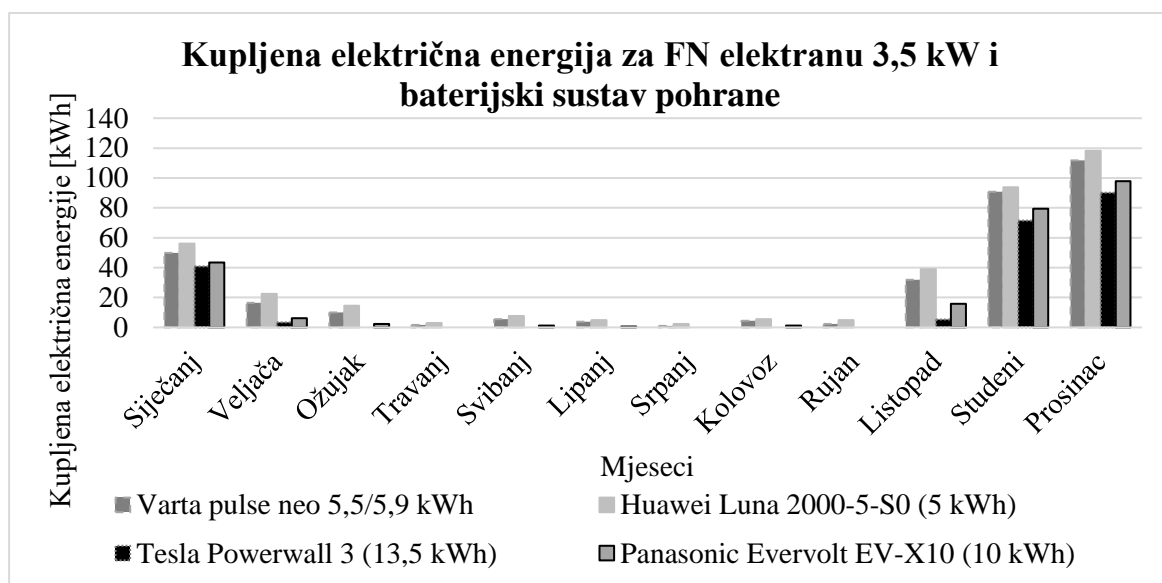
Period otplate baterijskog sustava pohrane *Tesla Powerwall 3 (13,5 kWh)* iznosi:

$$PO_{bat} = \frac{C_{bat}}{T_{god,FN} - T_{god,bat}} = \frac{8700}{153,52 - 83,38} = 124,04 \text{ godina}$$

Iz proračuna otplate investicije u promatrane baterijske sustave pohrane se zaključuje da se trenutno promatranom kućanstvu ne isplati ulagati u baterijski sustav pohrane, budući da će s razlikom u cijeni između ukupnih godišnjih troškova operativnog scenarija s FN elektranom 2 kW i operativnog scenarija s FN elektranom 2 kW i baterijskim sustavom pohrane u najboljem slučaju isplatiti investiciju kroz 53,59 godine. Naglašava se da su garancije proizvođača između 10 i 12 godina na baterijski sustav pohrane. Stoga se konačno zaključuje da bez reakcije države i otvaranja fondova poticaja se trenutno ne isplati ulagati u baterijske sustave pohrane električne energije u kućanstvima. Navedena tehnologija ima značajan potencijal i rješava probleme koje višak proizvodnje iz FN elektrane stvara u mreži, no s ekonomske strane potreban je pad cijene baterijskih sustava pohrane ili značajna sustav poticaja od strane države kako bi se značajno povećala ulaganja kućanstava u baterijske sustave pohrane.

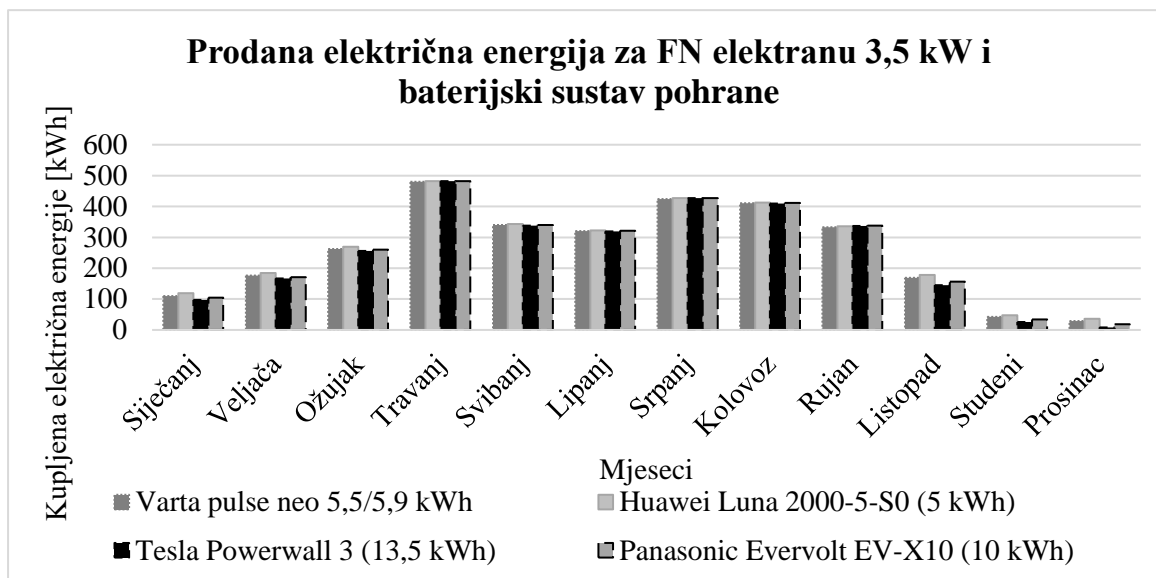
5.4.2. Kućanstvo s FN elektranom instalirane snage 3,5 kW i baterijskim sustavom pohrane električne energije

U ovome operativnom scenariju pretpostavlja se da promatrano kućanstvo ima integriranu FN elektranu instalirane snage 3,5 kW te će se promatrati utjecaj integracije različitih baterijskih sustava pohrane električne energije. U ovom operativnim scenariju prikazati će se odnos između kupljene i prodane električne energije u mrežu, tablica s Ci te ukupni mjesečni troškovi promatranog kućanstva za navedeni operativni scenarij. Zaključno će biti prikazan period povrata investicije baterijskog sustava pohrane električne energije za koje je to moguće izračunati.



Slika 5.35. Prikaz kupljene električne energije za FN elektranu 3,5 kW i baterijski sustav pohrane

Na slici 5.35. prikazana je kupljena električna energija od strane promatranog kućanstva za operativni scenarij s FN elektranom 3,5 kW i promatranim baterijskim sustavima pohrane električne energije. Uspoređujući s operativnim scenarijom s FN elektranom 3,5 kW zaključuje se da se kupljena električna energija promatranog kućanstva smanjila zbog integracije baterijskog sustava pohrane koji viškove proizvedene električne energije iz FN elektrane koristiti za vlastito punjenje. U periodima manjka proizvodnje električne energije iz FN elektrane, navedeni baterijski sustav pohrane se prazni te daje potrebnu električnu energiju kućanstvu te i na taj način utječe na smanjenje kupljene električne energije iz mreže.



Slika 5.36. Prikaz prodane električne energije za FN elektranu 3,5 kW i baterijski sustav pohrane

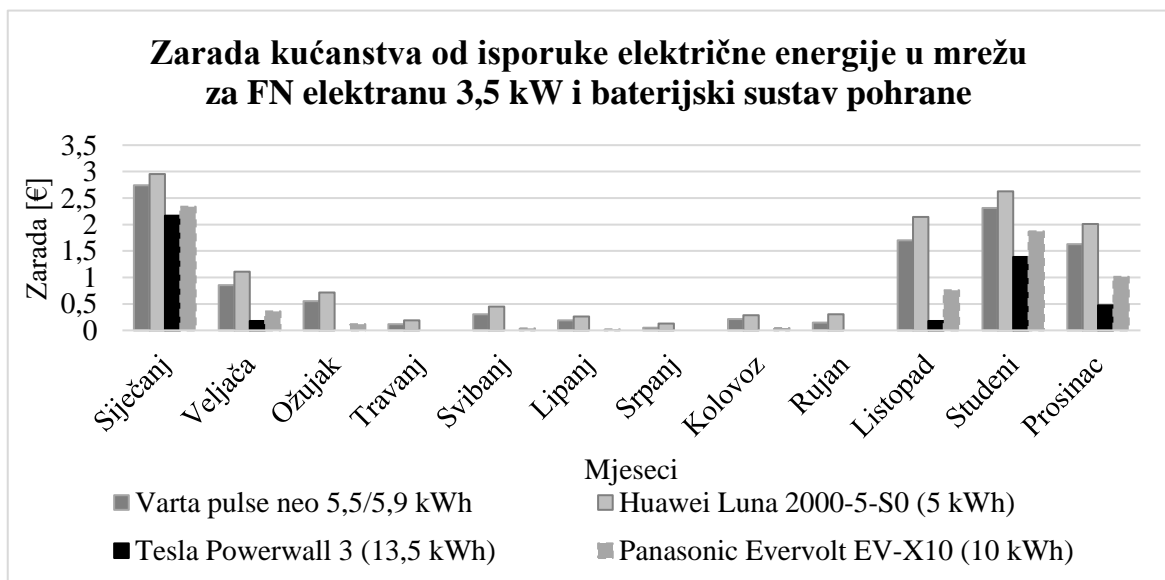
Na slici 5.36. prikazana je prodana električna energija u mrežu za operativni scenarij promatranog kućanstva s FN elektranom 3,5 kW i baterijskim sustavom pohrane električne energije. Uspoređujući s operativnim scenarijom u kojemu promatrano kućanstvo ima integriranu FN elektranu 3,5 kW, količina prodane električne energije u mrežu je manja u ovome operativnom scenariju, zbog integracije baterijskog sustava pohrane električne energije koji smanjuje razmjenu električne energije s mrežom. Zaključuje se da se s integracijom bilo kojega od promatrana četiri baterijska sustava pohrane dobiva slična količina prodane električne energije u mrežu.

Tablica 5.8. Cijena prodane električne energije po mjesecima za FN elektranu 3,5 kW i baterijskim sustavom pohrane

Mjesec	Ci [€/kWh]			
	<i>Varta pulse neo</i> 6,5/5,9 kWh	<i>Huawei Luna</i> 2000-5-S0 (5 kWh)	<i>Tesla Powerwall 3</i> (13,5 kWh)	<i>Panasonic Evervolt</i> EV-X10 (10 kWh)
Siječanj	0,0249	0,0247	0,0222	0,0224
Veljača	0,0048	0,0060	0,0011	0,0021
Ožujak	0,0021	0,0027	0,0000	0,0005
Travanj	0,0002	0,0004	0,0000	0,0000
Svibanj	0,0009	0,0013	0,0000	0,0001

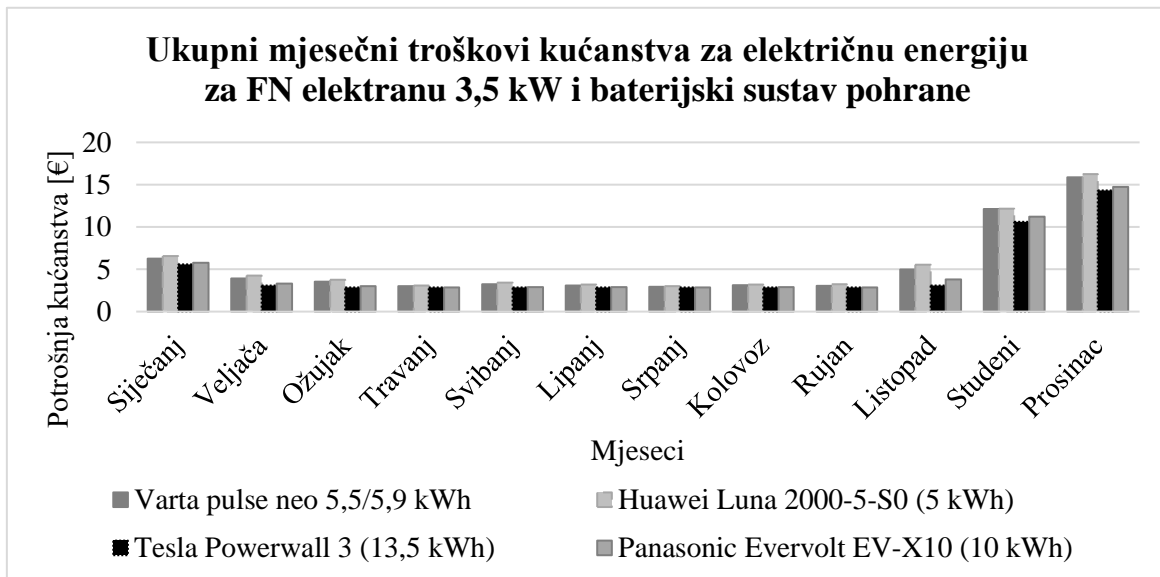
Lipanj	0,0006	0,0008	0,0000	0,0001
Srpanj	0,0001	0,0003	0,0000	0,0000
Kolovoz	0,0005	0,0007	0,0000	0,0001
Rujan	0,0004	0,0009	0,0000	0,0000
Listopad	0,0100	0,0120	0,0012	0,0048
Studeni	0,0551	0,0552	0,0548	0,0556
Prosinac	0,0560	0,0559	0,0562	0,0561

U tablici 5.8. prikazana je jedinična cijena prodane električne energije po mjesecima za FN elektranu 3,5 kW i baterijski sustav pohrane. Iz prikazanoga se zaključuje da se s povećanjem vlastitih energetske potencijala (povećanjem snage FN elektrane i baterijskog sustava pohrane) smanjuje cijena prodane električne energije u mrežu, zbog pravila koje propisuje HEP ODS. Uspoređujući s operativnim scenarijima promatranog kućanstva s FN elektranom 3,5 kW i promatranog kućanstva s FN elektranom 2 kW i baterijskim sustavom pohrane, zaključuje se da se Ci općenito smanjio u ovome operativnom scenariju u odnosu na navedene. Sve vrijednosti su izračunate pomoću izraza 5-7 i 5-8.



Slika 5.37. Prikaz zarade kućanstva od isporuke električne energije u mrežu za FN elektranu 3,5 kW i baterijski sustav pohrane

Na slici 5.37. prikazana je zarada promatranog kućanstva od isporuke električne energije u mrežu za FN elektranu 3,5 kW i baterijski sustav pohrane. Zaključuje se da je zarada kućanstva manja što je veći kapacitet baterijskog sustava pohrane električne energije. Razlog tome je što baterijski sustav pohrane električne energije s većim kapacitetom može opskrbiti kućanstvo s većom količinom električne energije te s time smanjuje razmjenu električne energije između kućanstva i mreže te samim time i zaradu od isporučene električne energije u mrežu.



Slika 5.38. Prikaz ukupnih mjesečnih troškova kućanstva za električnu energiju za FN elektranu 3,5 kW i baterijski sustav pohrane

Na slici 5.38. prikazani su ukupni mjesečni troškovi kućanstva za operativni scenarij s integriranom FN elektranom 3,5 kW i baterijskim sustavom pohrane električne energije. Ukupni godišnji troškovi se dobiju zbrojem ukupnih mjesečnih troškova te iznose za korištenje baterijskog sustava pohrane proizvođača Varta 65,04 €, za baterijski sustav pohrane proizvođača Huawei 67,63 €, za baterijski sustav pohrane proizvođača Tesla 56,93 € te za baterijski sustav pohrane električne energije proizvođača Panasonic 59,07 €. Ukupni godišnji troškovi za operativni scenarij promatranog kućanstva s integriranom FN elektranom 3,5 kW iznose 125,24 €. Iz svega navedenog se zaključuje da razlika u ukupnim godišnjim troškovima između promatranih baterijskih sustava nije značajna. Navedeni podaci su izračunati prema izrazu 5-10.

Period otplate investicije za promatrane baterijske sustave pohrane se izračunava prema izrazu 5-13.

Period otplate baterijskog sustava pohrane *Varta pulse neo 6,5/5,9 kWh* iznosi:

$$PO_{\text{bat}} = \frac{C_{\text{bat}}}{T_{\text{god,FN}} - T_{\text{god,bat}}} = \frac{4990,00}{125,24 - 65,04} = 82,89 \text{ godina}$$

Period otplate baterijskog sustava pohrane *Huawei Luna 2000-5-S0 (5 kWh)* iznosi:

$$PO_{\text{bat}} = \frac{C_{\text{bat}}}{T_{\text{god,FN}} - T_{\text{god,bat}}} = \frac{3103,90}{125,24 - 67,63} = 53,88 \text{ godina}$$

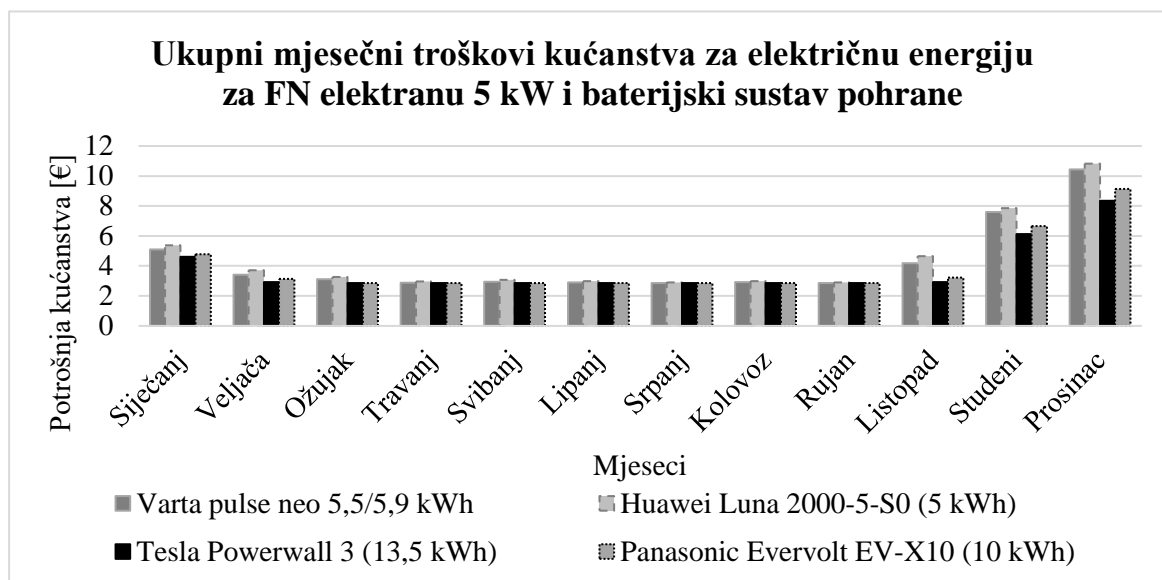
Period otplate baterijskog sustava pohrane *Tesla Powerwall 3 (13,5 kWh)* iznosi:

$$PO_{\text{bat}} = \frac{C_{\text{bat}}}{T_{\text{god,FN}} - T_{\text{god,bat}}} = \frac{8700}{125,24 - 56,93} = 127,36 \text{ godina}$$

Iz proračuna otplate investicije u promatrane baterijske sustave pohrane se zaključuje da se trenutno promatranom kućanstvu ne isplati ulagati u baterijski sustav pohrane, budući da će s razlikom u cijeni između ukupnih godišnjih troškova operativnog scenarija s FN elektranom 3,5 kW i operativnog scenarija s FN elektranom 3,5 kW i baterijskim sustavom pohrane u najboljem slučaju isplatiti investiciju kroz 53,88 godine. Zaključuje se da se u odnosu na operativni scenarij promatranog kućanstva s integriranom FN elektranom 2 kW i baterijskim spremnikom energije u ovome operativnom scenariju dodatno povećava period otplate investicije baterijskog sustava pohrane električne energije. Naglašava se da su garancije proizvođača između 10 i 12 godina na baterijski sustav pohrane. Stoga se konačno zaključuje da bez reakcije države i otvaranja fondova poticaja se trenutno ne isplati ulagati u baterijske sustave pohrane električne energije u kućanstvima. Navedena tehnologija ima značajan potencijal i rješava probleme koje višak proizvodnje iz FN elektrane stvara u mreži, no s ekonomske strane potreban je pad cijene baterijskih sustava pohrane ili značajna sustav poticaja od strane države kako bi se značajno povećala ulaganja kućanstava u baterijske sustave pohrane.

5.4.3. Kućanstvo s FN elektranom instalirane snage 5 kW i baterijskim sustavom pohrane električne energije

Za ovaj operativni scenarij bit će prikazani isključivo ukupni godišnji troškovi za električnu energiju promatranog kućanstva te period otplate investicije baterijskog sustava pohrane električne energije, budući da se iz prethodna dva operativna scenarija može zaključiti da je u ovome operativnom scenariju zarada manja nego u prethodna dva budući da je u ovome operativnom scenariju instalirana snaga FN elektrane veća nego u prethodna dva, također se zaključuje da je dodatno smanjena razmjena električne energije između kućanstva i mreže budući da u ovome operativnom scenariju promatrano kućanstvo sadrži najveći energetske potencijal (FN elektrana snage 5 kW te baterijski spremnik energije), što posljedično utječe na dodatno smanjenje PKCi i Ci.



Slika 5.39. Prikaz ukupnih mjesečnih troškova kućanstva za električnu energiju za FN elektranu 5 kW i baterijski sustav pohrane

Na slici 5.39. prikazani su ukupni mjesečni troškovi promatranog kućanstva za električnu energiju za FN elektranu 5 kW i baterijski sustav pohrane. Ukupni godišnji troškovi se dobiju zbrojem ukupnih mjesečnih troškova te iznose za korištenje baterijskog sustava pohrane proizvođača Varta 51,17 €, za baterijski sustav pohrane proizvođača Huawei 53,46 €, za baterijski sustav pohrane proizvođača Tesla 44,86 € te za baterijski sustav pohrane električne energije proizvođača Panasonic 46,86 €. U operativnom scenariju promatranog kućanstva s integriranom FN elektranom snage 5 kW ukupni godišnji troškovi iznose 111, 98 €. Zaključuje se da razlika između ukupnih

godišnjih troškova u ovome operativnom scenariju između promatranih baterijskih sustava pohrane nije značajna.

Period otplate investicije za promatrane baterijske sustave pohrane se izračunava prema izrazu 5-13.

Period otplate baterijskog sustava pohrane *Varta pulse neo 6,5/5,9 kWh* iznosi:

$$PO_{\text{bat}} = \frac{C_{\text{bat}}}{T_{\text{god,FN}} - T_{\text{god,bat}}} = \frac{4990,00}{111,98 - 51,17} = 82,06 \text{ godina}$$

Period otplate baterijskog sustava pohrane *Huawei Luna 2000-5-S0 (5 kWh)* iznosi:

$$PO_{\text{bat}} = \frac{C_{\text{bat}}}{T_{\text{god,FN}} - T_{\text{god,bat}}} = \frac{3103,90}{111,98 - 53,46} = 53,04 \text{ godina}$$

Period otplate baterijskog sustava pohrane *Tesla Powerwall 3 (13,5 kWh)* iznosi:

$$PO_{\text{bat}} = \frac{C_{\text{bat}}}{T_{\text{god,FN}} - T_{\text{god,bat}}} = \frac{8700}{111,98 - 44,86} = 129,62 \text{ godina}$$

Iz proračuna otplate investicije u promatrane baterijske sustave pohrane se zaključuje da se trenutno promatranom kućanstvu ne isplati ulagati u baterijski sustav pohrane, budući da će s razlikom u cijeni između ukupnih godišnjih troškova operativnog scenarija s FN elektranom 3,5 kW i operativnog scenarija s FN elektranom 3,5 kW i baterijskim sustavom pohrane u najboljem slučaju isplatiti investiciju kroz 53,04 godine.

Konačno se zaključuje iz ove tehno-ekonomske analize da se za promatrano kućanstvo trenutno ne isplati ulagati u baterijske sustave pohrane električne energije zbog predugačkog perioda otplate investicije. Kroz cijeli diplomski rad su se prikazale mogućnosti koje baterijski sustavi pohrane mogu pružiti kućanstvu, no glavni razlog ne isplativosti ulaganja jesu inicijalni investicijski troškovi. Zaključuje se da ukoliko se želi povećati broj kućanstava s baterijskim sustavima pohrane električne energije potrebno je smanjiti inicijalne investicijske troškove, a to je moguće kroz daljnji razvoj tehnologije i masovnu proizvodnju, no da bi se to dogodilo proizvođačima baterijskih sustava pohrane potrebna je određena sigurnost prodaje baterijskih sustava pohrane električne energije. Stoga se konačno zaključuje da će ključnu ulogu u povećanju integracije baterijskih sustava pohrane u kućanstvima igrati države s poticajima i fondovima pomoću kojih bi se smanjili inicijalni investicijski troškovi i smanjio period otplate baterijskih sustava pohrane.

6. ZAKLJUČAK

Baterijski sustavi pohrane električne energije imaju široku mogućnost primjene unutar elektroenergetskog sustava, te se svake godine značajno povećava ukupna instalirana snaga baterijskih sustava pohrane na svjetskoj razini. Osnovna podjela baterijskih sustava pohrane električne energije je na: sekundarne baterije i protočne baterije.

Najzastupljenije i najpopularnije tehnologije sekundarnih baterija su: olovno-kiselinske baterije, nikal-kadmij baterije, nikal-metal hidrid baterije, litij-ionske baterije, metal-zrak baterije, natrij-sumpor baterije te natrij-nikal klorid baterije. Sve navedene vrste sekundarnih baterija sadrže potencijal za daljnji razvoj te proširenje postojećih primjena. Protočne baterije su uglavnom napravljene na redoks principu te svoju prednost pronalaze u mogućnosti punjenja, budući da je u navedenoj vrsti baterija moguće zamijeniti elektrolit, te time vratiti kapacitet baterije na 100 %.

Provedena je SWOT analiza primjene stacionarnih baterijskih sustava u kućanstvima, budući da baterijski sustavi pohrane u većem dijelu pronalaze primjenu kao sustavi pohrane na razini mreže, dok na razini kućanstva ne pronalaze još uvijek primjenu u velikom postotku. Jakosti primjene baterijskih sustava pohrane električne energije su: smanjenje troškova električne energije u kućanstvu, veći stupanj energetske neovisnosti, smanjenje ugljičnog otiska, povećanje postotka potrošnje električne energije iz vlastite proizvodnje iz FN elektrane te pružanje mogućnosti smanjenja vršne potražnje električne energije kućanstva. Slabosti primjene baterijskih sustava pohrane električne energije su: visoki inicijalni troškovi, ograničen kapacitet baterijskog sustava pohrane, potreban prostor za smještaj baterijskog sustava, ograničen životni vijek baterija te potreba za pretvaračima energetske elektronike. Kao glavne prilike se ističu: mogućnost razvoja sustava poticanja od strane države, povećanje vrijednosti nekretnina, poboljšanje elektroenergetske infrastrukture u ruralnim područjima, mogućnosti pružanja usluga elektroenergetskom sustavu te smanjenje cijene baterijskih sustava kroz daljnji razvoj i povećanu proizvodnju. Kao glavne prijetnje integraciji ističu se: ljudski otpor prema tehnologiji, povećanje cijena sirovina za proizvodnju baterija, prijetnja ostalih tehnologija pohrane u vidu investicija za daljnji razvoj i istraživanje, sigurnosni rizici te reguliranje temperature baterijskog sustava i vanjskih izvora topline prema baterijskom sustavu.

Prikazani su trenutno dostupni stacionarni baterijski sustavi pohrane električne energije za kućanstva na tržištu. Usporedile su se međusobne karakteristike prikazanih baterijskih sustava.

U praktičnome dijelu provedena je tehno-ekonomska analiza primjene stacionarnih baterijskih sustava na primjeru jednog kućanstva u Osijeku. Analizirali su se operativni scenariji bez primjene FN elektrane i bez baterijskih sustava pohrane, zatim operativni scenariji s FN elektranom različitih instaliranih snaga te konačno operativni scenariji s FN elektranom i baterijskim sustavom pohrane električne energije. Analizirani su ukupni mjesečni troškovi za svaki promatrani operativni scenarij, te period povrata investicije baterijskih sustava pohrane. Donesen je zaključak da se promatranom kućanstvu trenutno ne isplati ulagati u baterijske sustave pohrane električne energije budući da u najboljem slučaju period otplate investicije iznosi 53,04 godine, a garancija na baterijski sustav pohrane iznosi između 10 i 12 godina ovisno o proizvođaču. Iz svega navedenoga se zaključuje da će se ulaganja u baterijske sustave pohrane električne energije moći isplatiti ukoliko država uvede fondove za sufinanciranje i sustave poticaja.

LITERATURA

- [1] M. Vrhovac, "Primjena sustava za pohranu energije u elektroenergetskom sustavu", Diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Osijek, 2021. Dostupno na : <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:441399> (pristup 6.3.2024.)
- [2] Z. Šimić, G. Knežević, D. Topić, i D. Pelin, „Battery energy storage technologies overview“, Int. J. Electr. Comput. Eng. Syst., sv. 12, izd. 1, str. 53–65, 2021. <https://ijeces.ferit.hr/index.php/ijeces/article/view/23> (pristup 6.3.2024.)
- [3] J.M. González-González, Á. Paredes Parrilla, J.A. Aguado, Chemical energy storage technologies, Encyclopedia of Electrical and Electronic Power Engineering, Elsevier, Str 426-439, ISBN 9780128232118, 2023., <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128212042001008> pristupljeno (8.4.2024.)
- [4] J. Hoppmann, J. Volland, T.S. Schmidt, V.H. Hoffmann, The economic viability of battery storage for residential solar photovoltaic systems – A review and a simulation model, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 39, Str 1101-1118, ISSN 1364-0321 , 2014., <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114005206> pristupljeno (8.5.2024.)
- [5] X. Han, J. Garrison, G. Hug, Techno-economic analysis of PV-battery systems in Switzerland, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 158, 112028, ISSN 1364-0321, 2022., <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121012909> pristupljeno (9.6.2024.)
- [6] IEA (2014), Technology Roadmap - Energy Storage, IEA, Paris, ožujak 2014. <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-energy-storage> , Licence: CC BY 4.0, (pristup 6.3.2024.)
- [7] D. Topić , „Predavanje kolegija – Pohrana i električna vozila u EES: Sustavi pohrane električne energije,2022./2023., Fakultet elektrotehnike računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek“.
- [8] Y. Ding, Y. Li, C. Liu, i Z. Sun, „Solar Electrical Energy Storage“, Sol. Energy Storage, str. 7–25, 2015.

- [9] International Electrotechnical Commission – IEC "Electrical Energy Storage", 2011. , <https://www.iec.ch/basecamp/electrical-energy-storage> (pristup 6.3.2024.)
- [10] M. Žnidarec , „Predavanje kolegija – Napredne elektroenergetske mreže, 2023./2024., ., Fakultet elektrotehnike računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek“.
- [11] Concordia University, »Lead acid batteries,« 2016., dostupno na: https://www.concordia.ca/content/dam/concordia/services/safety/docs/EHS-DOC146_LeadAcidBatteries.pdf (pristup 3.4.2024.)
- [12] PV education, Operation of Lead Acid Batteries, PV education [online], 2020., <https://www.pveducation.org/pvcdrom/lead-acid-batteries/operation-of-lead-acid-batteries> (pristup 3.4.2024.)
- [13] V. Bobanec, I.Pavić, N.Čović, M.Miletić, H.Pandžić, I.Andročec, „Skripta verzija 1.0. – Baterijski spremnici energije, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb“, 2021.
- [14] Battery University, BU-403: Charging Lead Acid, Battery university [online], 2023. <https://batteryuniversity.com/article/bu-403-charging-lead-acid> (pristup 3.4.2024.)
- [15] European Association for Storage of Energy, Nickel-Cadimium battery, European Association for Storage of Energy [online], 2022., https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/07/EASE_TD_Electrochemical_NiCd.pdf (pristup 4.4.2024.)
- [16] L. Zhang, S. Revathi, Batteries, Rechargeable, Encyclopedia of Materials: Electronics, Academic Press, 2023, Str 283-307, ISBN 9780128197356. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B978012819728800067X> , pristupljeno (4.4.2024.)
- [17] Battery University, BU-409: Charging lithium-ion, Battery university [online], 2021. <https://batteryuniversity.com/article/bu-409-charging-lithium-ion> , pristupljeno (5.4.2024.)
- [18] L. Yaqoob, T. Noor, N. Iqbal, An overview of metal-air batteries, current progress, and future perspectives, Journal of Energy Storage, Volume 56, Part B, 106075, ISSN 2352-152X, 2022., <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X22020631>, pristupljeno (7.4.2024)

- [19] European Association for Storage of Energy, Metal-Air Battery, European Association for Storage of Energy [online], 2022., https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/03/EASE_TD_M-Air.pdf , pristupljeno (7.4.2024.)
- [20] P. Kumar, S. Bansal, A. Sonthalia, Chapter 4 - Introduction to battery systems, Handbook of Thermal Management Systems, Elsevier, Str 95-118, ISBN 9780443190179 , 2023., <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/metal-air-battery> , pristupljeno (7.4.2024.)
- [21] L. Zhou, W. Utetiwabo, R. Chen, W. Yang, 2.12 - Layer by Layer Assemble of Colloid Nanomaterial and Functional Multilayer Films for Energy Storage and Conversion, Comprehensive Nanoscience and Nanotechnology (Second Edition), Academic Press, Str 255-278, ISBN 9780128122969, 2019., <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128035818113542> pristupljeno (8.4.2024.)
- [22] U. Koehler, Chapter 2 - General Overview of Non-Lithium Battery Systems and their Safety Issues, Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications, Elsevier, Str 21-46, ISBN 9780444637772, 2019., <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780444637772000025> pristupljeno (8.4.2024.)
- [23] A. Arabkoohsar, Chapter One - Classification of energy storage systems, Mechanical Energy Storage Technologies, Academic Press, Str 1-12, ISBN 9780128200230, 2021., <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128200230000018> pristupljeno (8.4.2024.)
- [24] Vsun energy, VRB applications, Vsun energy [online], 2024. <https://vsunenergy.com.au/vrb-applications/> pristupljeno (9.4.2024.)
- [25] V. Ruiz Leotaud, How energy-deprived areas benefit from vanadium redox batteries, Mining.com [online], 2019., <https://www.mining.com/energy-deprived-areas-benefit-vanadium-redox-batteries/> pristupljeno (17.5.2024.)
- [26] R.W. Puyt, F. Birger Lie, C.P.M. Wilderom, The origins of SWOT analysis, Long Range Planning, Volume 56, Issue 3, 102304, ISSN 0024-6301, 2023., <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0024630123000110> pristupljeno (6.5.2024.)

- [27] D. Crnjac-Milić , „Predavanje kolegija – Projektni Menadžment, 2023./2024., ., Fakultet elektrotehnike računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek“.
- [28] BloombergNEF i Pylon Tech, Scaling the Residential Energy Storage Market, Bloomberg [online], 2023., <https://assets.bbhub.io/professional/sites/24/Scaling-the-Residential-Energy-Storage-Market.pdf> pristupljeno (8.5.2024.)
- [29] Greentech Power Solutions, The Significance of Battery Storage for Your Residential Solar System, LinkedIn [online], 2023., <https://www.linkedin.com/pulse/significance-battery-storage-your-residential> pristupljeno (8.5.2024.)
- [30] IRENA, Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2017., <https://www.irena.org/Publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets> pristupljeno (8.5.2024.)
- [31] NREL, Residential Battery Storage, NREL, 2023., https://atb.nrel.gov/electricity/2023/residential_battery_storage pristupljeno (8.5.2024.)
- [32] Tesla, *Powerwall* Whole-Home Backup,24/7, Tesla [online], 2024., <https://www.tesla.com/powerwall> pristupljeno (18.5.2024.)
- [33] U. Shakir, Tesla unveils *Powerwall* 3, this time with a built-in solar inverter, TheVerge [online], 2023., <https://www.theverge.com/2023/9/13/23871576/tesla-powerwall-3-battery-solar-inverter-introduced> pristupljeno (18.5.2024.)
- [34] Tesla, *Powerwall* 3 Specifications, Tesla [online], 2024., <https://service.tesla.com/docs/Public/Energy/Powerwall/Powerwall-3-with-Gateway-3-Installation-Manual-NA-EN/GUID-EC527BC7-4750-4425-BBC4-DB8C000339B3.html> pristupljeno (18.5.2024.)
- [35] Huawei, *Luna2000-(5-30)-NHS0* User Manual, Huawei [online], 2024., <https://support.huawei.com/enterprise/en/doc/EDOC1100186676/661b0e12/luna2000-battery-system-specifications> pristupljeno (19.5.2024.)
- [36] Mg-solar-shop, *Huawei Luna2000-15-S0* battery storage 15 kWh, Mg-solar-shop [online], 2024., <https://www.mg-solar-shop.com/huawei-luna2000-15-s0-battery-storage-15-kwh> pristupljeno (19.5.2024.)

- [37] Panasonic, *Evervolt* Home battery, Panasonic [online], 2024., <https://na.panasonic.com/us/energy-solutions/battery-storage/evervolt-battery-storage-system/evervoltr-home-battery> pristupljeno (19.5.2024.)
- [38] Varta, *Varta element backup*, Varta [online], 2024., <https://www.varta-ag.com/uk/consumer/product-categories/energy-storage-systems/varta-element-backup> pristupljeno (19.5.2024.)
- [39] SecondSol The photovoltaic marketplace, *Varta element backup 12*, SecondSol The photovoltaic marketplace [online], 2024., <https://www.secondsol.com/en/anzeige/39039/zonne-batterijen/lithium/vatra-storage/varta-element-backup-12> pristupljeno (19.5.2024.)
- [40] Hrvatska elektroprivreda, Tarifni modeli, Hrvatska elektroprivreda [online], 2024., <https://www.hep.hr/ods/korisnici/kucanstvo/tarifni-modeli/34> pristupljeno (12.6.2024.)
- [41] Europe Solar Store, *Varta pulse 6 energy storage*, Europe Solar Store [online], 2024., <https://www.europe-solarstore.com/varta-pulse-6-energy-storage.html> pristupljeno (16.6.2024.)
- [42] Varta, *Varta pulse neo*, Varta [online], 2024., <https://www.varta-ag.com/en/consumer/product-categories/energy-storage-systems/varta-pulse-neo> pristupljeno (16.6.2024.)

SAŽETAK

Zadatak ovog diplomskog rada je analizirati primjenu stacionarnih baterijskih sustava u kućanstvima. U ovome radu su definirani baterijski sustavi pohrane, te najpopularnije tehnologije baterijskih sustava pohrane. Opisane su karakteristike tehnologija baterijskih sustava pohrane te njihove primjene. Navedeni su izazovi te mogućnosti daljnjeg istraživanja tehnologija baterijskih sustava pohrane. Napravljena je SWOT analiza primjene baterijskih sustava pohrane u kućanstvima, te su prikazani trenutno dostupni stacionarni baterijski sustavi pohrane električne energije za kućanstva na tržištu. U praktičnome dijelu diplomskog rada, napravljena je tehnno-ekonomska analiza primjene stacionarnih baterijskih sustava na primjeru jednog kućanstva u Osijeku te su se donijeli zaključci o isplativosti integracije baterijskih sustava pohrane električne energije u promatrano kućanstvo.

Ključne riječi: Baterijski sustav pohrane, kućanstvo, smanjenje troškova, tehnno-ekonomska analiza, tehnologije baterija

TITLE: Application of stationary battery systems in households

ABSTRACT

The task of this master thesis is to analyze the application of stationary battery systems in households. In this thesis, battery storage systems and the most popular technologies of battery storage systems are defined. The characteristics of battery storage system technologies and thier applications are described. Challenges and opportunities for further research into battery storage system technologies are listed. A SWOT analysis of the application of battery storage systems in households was made, and currently available stationary battery storage systems for households on the market were presented. In the practial part of the thesis, techno-economic analysis of the application of stationary battery systems for one household in Osijek was made. Conclusions were drawn on the profitability of integrating battery systems for electricity storage in the observed household.

Key words: Battery storage system, household, cost reduction, techno-economic analysis, battery technologies

ŽIVOTOPIS

Tomislav Markotić rođen je 28. siječnja 2001. u Osijeku. Nakon završene osnovne škole, 2015. upisuje III. Gimnaziju Osijek koju završava 2019. Nakon srednjoškolskog obrazovanja, svoj put nastavlja 2019. na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek gdje upisuje preddiplomski studij Elektrotehnike i informacijskih tehnologija. Na drugoj godini studija odabire izborni blok Elektroenergetika. 2022. završava preddiplomski studij i stječe akademski naziv sveučilišnog prvostupnika inženjera elektrotehnike i informacijskih tehnologija. Iste godine upisuje diplomski studij Elektrotehnike, smjera Elektroenergetike izbornog bloka Održiva elektroenergetika. Tijekom prve godine diplomskog studija dobiva nagradu fakulteta za izvannastavne aktivnosti kojima promiče ugled fakulteta. 2024. na drugoj godini diplomskog studija dobiva nagradu fakulteta za uspješnost u studiranju. U prosincu 2022. izabran je za predsjednika Studentskog sportskog kluba FERITOS, također je član skupštine Studentskog sportskog saveza Sveučilišta u Osijeku od 2021. Tijekom fakultetskog puta do 2021. aktivno se bavio stolnim tenisom te je bio kategorizirani sportaš 3. kategorije prema Hrvatskom olimpijskom odboru. Aktivno se služi Engleskim jezikom u govoru i pismu.

POPIS SLIKA I TABLICA

POPIS SLIKA:

Slika 3.1. Podjela sustava pohrane električne energije [7].....	5
Slika 3.2. Punjenje i pražnjenje sekundarnih baterija [1].....	6
Slika 3.3. Podjela sekundarnih baterija [9]	7
Slika 3.4. Prikaz punjenja i pražnjenja protočnih baterija [10]	7
Slika 3.5. Prikaz punjenja u tri koraka olovno-kiselinskih baterija [17].....	9
Slika 3.6. Prikaz punjenja litij-ionskih baterija u četiri koraka [17]	17
Slika 3.7. Podjela protočnih redoks baterija.....	24
Slika 3.8. Prikaz protočne baterije u primjeni [25]	26
Slika 4.1. Prikaz izgleda matrice SWOT analize	28
Slika 4.2. Prikaz modela Tesla Powerwall [32].....	34
Slika 4.3. Prikaz Tesla Powerwall 3 baterijskog sustava pohrane [33]	35
Slika 4.4. Prikaz modela baterijskih sustava pohrane proizvođača Huawei [35].....	36
Slika 4.5. Prikaz Huawei Luna 2000-4,95-15 baterijskog sustava pohrane [36]	37
Slika 4.6. Prikaz baterijskih sustava pohrane proizvođača Panasonic [37]	39
Slika 4.7. Prikaz Panasonic Evervolt EV-X15 baterijskog sustava pohrane [37]	39
Slika 4.8. Prikaz baterijskih sustava pohrane proizvođača Varta [38]	41
Slika 4.9. Prikaz Varta element backup 12 baterijskog sustava pohrane [38].....	42
Slika 5.1. Prikaz potrošnje električne energije kućanstva po mjesecima.....	45
Slika 5.2. Prikaz satne potrošnje električne energije u jednome tjednu	46
Slika 5.3. Prikaz sunčeve dozačenosti na području grada Osijeka	47
Slika 5.4. Prikaz sunčeve dozačenosti za karakteristični ljetni tjedan	47
Slika 5.5. Prikaz sunčeve dozačenosti za karakteristični zimski tjedan	48
Slika 5.6. Prikaz prosječne temperature okoline za ljetni tjedan	49
Slika 5.7. Prikaz prosječne temperature okoline za zimski tjedan	49
Slika 5.8. Mjesečna preuzeta električna energija kućanstva u višoj i nižoj tarifi.....	52
Slika 5.9. Prikaz mjesečnih troškova kućanstva za električnu energiju.....	53
Slika 5.10. Prikaz proizvodnje FN elektrane 2 kW za karakteristični ljetni tjedan	55
Slika 5.11. Prikaz proizvodnje FN elektrane 2 kW za karakteristični zimski tjedan	56
Slika 5.12. Prikaz mjesečne proizvodnje FN elektrane 2 kW	58
Slika 5.13. Prikaz odnosa kupljene i prodane električne energije za FN elektranu 2 kW	59

Slika 5.14. Prikaz zarade kućanstva od isporuke električne energije u mrežu za FN elektranu 2 kW	62
Slika 5.15. Prikaz ukupnih mjesečnih troškova za električnu energiju s FN elektranom 2 kW ...	63
Slika 5.16. Prikaz mjesečne proizvodnje FN elektrane 3,5 kW	64
Slika 5.17. Prikaz odnosa kupljene i prodane električne energije za FN elektranu 3,5 kW	64
Slika 5.18. Prikaz zarade kućanstva od isporuke električne energije u mrežu za FN elektranu 3,5 kW	66
Slika 5.19. Ukupni mjesečni troškovi kućanstva za električnu energiju s FN elektranom 3,5 kW	67
Slika 5.20. Prikaz mjesečne proizvodnje FN elektrane 5 kW	68
Slika 5.21. Prikaz odnosa kupljene i prodane električne energije za FN elektranu 5 kW	69
Slika 5.22. Prikaz zarade kućanstva od isporuke električne energije u mrežu za FN elektranu 5 kW	70
Slika 5.23. Prikaz ukupnih mjesečnih troškova kućanstva za električnu energiju s FN elektranom 5 kW	71
Slika 5.24. Prikaz usporedbe ukupnih godišnjih troškova za električnu energiju promatranog kućanstva	72
Slika 5.25. Prikaz trenutnog kapaciteta baterijskih sustava pohrane za karakteristični ljetni dan uz FN elektranu 2 kW	76
Slika 5.26. Prikaz trenutnog kapaciteta baterijskih sustava pohrane za karakteristični zimski dan uz FN elektranu 2 kW	76
Slika 5.27. Prikaz trenutnog stanja napunjenosti baterijskih sustava pohrane električne energije za karakteristični ljetni dan uz FN elektranu 2 kW	77
Slika 5.28. Prikaz trenutnog stanja napunjenosti baterijskih sustava pohrane za karakteristični zimski dan uz FN elektranu 2 kW	78
Slika 5.29. Prikaz snage punjenja i pražnjenja baterijskog sustava Varta pulse neo 6,5/6,9 kWh za karakteristični zimski dan uz FN elektranu 2 kW	79
Slika 5.30. Prikaz snage punjenja i pražnjenja baterijskog sustava Varta pulse neo 6,5/6,9 kWh za karakteristični ljetni dan uz FN elektranu 2 kW	80
Slika 5.31. Prikaz kupljene električne energije za FN elektranu 2 kW i baterijski sustav pohrane	81
Slika 5.32. Prikaz prodane električne energije za FN elektranu 2 kW i baterijski sustav pohrane	81

Slika 5.33. Prikaz zarade kućanstva od isporuke električne energije u mrežu za FN elektranu 2 kW i baterijski sustav pohrane	83
Slika 5.34. Prikaz ukupnih mjesečnih troškova kućanstva za električnu energiju za FN elektranu 2 kW i baterijski sustav pohrane	84
Slika 5.35. Prikaz kupljene električne energije za FN elektranu 3,5 kW i baterijski sustav pohrane	86
Slika 5.36. Prikaz prodane električne energije za FN elektranu 3,5 kW i baterijski sustav pohrane	87
Slika 5.37. Prikaz zarade kućanstva od isporuke električne energije u mrežu za FN elektranu 3,5 kW i baterijski sustav pohrane	88
Slika 5.38. Prikaz ukupnih mjesečnih troškova kućanstva za električnu energiju za FN elektranu 3,5 kW i baterijski sustav pohrane	89
Slika 5.39. Prikaz ukupnih mjesečnih troškova kućanstva za električnu energiju za FN elektranu 5 kW i baterijski sustav pohrane	91

POPIS TABLICA:

Tablica 3.1. Karakteristike olovno-kiselinskih baterija [2]	10
Tablica 3.2. Karakteristike nikal-kadmij baterija [2]	12
Tablica 3.3. Karakteristike nikal-metal hidrid baterija [2]	14
Tablica 3.4. Karakteristike litij-ionskih baterija [2]	18
Tablica 3.5. Karakteristike natrij-sumpor baterija [2]	22
Tablica 3.6. Karakteristike vanadij-redoks protočnih baterija [2]	25
Tablica 4.1. SWOT analiza primjene stacionarnih baterijskih sustava u kućanstvima [4] [28][29] [30] [31].....	29
Tablica 4.2. Karakteristike Tesla Powerwall 3 baterijskog sustava pohrane [34]	35
Tablica 4.3. Karakteristike Huawei Luna 2000-4,95-15 baterijskog sustava pohrane [35] [36] ..	37
Tablica 4.4. Karakteristike Panasonic Evervolt EV-X15 baterijskog sustava pohrane [37]	40
Tablica 4.5. Karakteristike Varta element backup 12 baterijskog sustava pohrane [38] [39]	42
Tablica 5.1. Tarifne stavke za višu i nižu tarifu [40]	51
Tablica 5.2. Tehničke karakteristike FN modula Bisol BMO-250 Wp	54
Tablica 5.3. Cijena prodane električne energije po mjesecima za FN elektranu 2 kW	61
Tablica 5.4. Cijena prodane električne energije po mjesecima za FN elektranu 3,5 kW	65
Tablica 5.5. Cijena prodane električne energije po mjesecima za FN elektranu 5 kW	69
Tablica 5.6. Glavne karakteristike korištenih baterijskih sustava pohrane [34] [35] [36] [37] [41] [42]	73
Tablica 5.7. Cijena prodane električne energije po mjesecima za FN elektranu 2 kW i baterijskim sustavom pohrane	82
Tablica 5.8. Cijena prodane električne energije po mjesecima za FN elektranu 3,5 kW i baterijskim sustavom pohrane	87