

# Optimalna ponuda sustava umreženih baterijskih spremnika na tržištu električne energije

---

**Ružić, Mislav**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

*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:200:336624>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-15**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Diplomski studij elektroenergetike**

**OPTIMALNA PONUDA SUSTAVA UMREŽENIH  
BATERIJSKIH SPREMNIKA NA TRŽIŠTU  
ELEKTRIČNE ENERGIJE**

**Diplomski rad**

**Mislav Ružić**

**Osijek, 2020.**

1. UVOD.....	1
2. PREGLED LITERATURE .....	2
3. BATERIJSKI SPREMNICI .....	3
3.1 VRSTE BATERIJSKIH SPREMNIKA .....	6
3.2 BATERIJSKI SPREMNİK TESLA MEGAPACK .....	8
3.2.1 Hornsdale baterijski spremnik .....	9
4. TRŽIŠTE ELEKTRIČNE ENERGIJE .....	12
4.1 CROPEX.....	13
4.1.1 Dan unaprijed tržište .....	13
5. OPTIMIZACIJSKI MODEL.....	19
5.1 OPIS OPTIMIZACIJSKOG MODELA .....	20
5.2 MATEMATIČKI ZAPIS OPTIMIZACIJSKOG MODELA .....	21
6. SIMULACIJE.....	24
6.1 SIMULACIJA PROCESA TIJEKOM ČETIRI DANA .....	24
6.2 SIMULACIJA PROCESA S RAZLIČITIM EFIKASNOSTIMA PUNJENJA I PRAŽNENJA .....	31
6.3 SIMULACIJA PROCESA S RAZLIČITOM BUDUĆOM CIJENOM.....	34
6.4 SIMULACIJA PROCESA TIJEKOM JEDNOG MJESECA .....	36
7. ZAKLJUČAK.....	37
SAŽETAK .....	38
ABSTRACT.....	39
ŽIVOTOPIS.....	40
LITERATURA.....	41

## 1. UVOD

Glavni problem elektroenergetskog sustava što proizvodnja mora u svakom trenutku odgovarati potrošnji, ali napretkom tehnologije stvaraju se uvjeti za skladištenjem električne energije, poput baterija velikog kapaciteta pa bi taj problem mogao biti znatno manje izražen i na taj način bi se smanjila mogućnost urušavanja elektroenergetskog sustava. Skladištenje električne energije u kombinaciji s vjetroelektranama i solarnim elektranama će uvelike pomoći u smanjenju emisije ugljikovog dioksida.

Budući da je cijena električne energije na tržištu promjenjiva, postoji mogućnost punjenja baterija tijekom noći kada je električna energija jeftinija te pražnjenja baterija kada je električna energija skuplja. Cilj ovoga postupka je ostvarivanje što većeg profita, izravnavanje dnevnog dijagrama opterećenja i stalna opskrba električnom energijom ruralnih područja gdje su česti prekidi u napajanju.

U radu će biti opisane mogućnosti davanja ponuda agregatora umreženih baterijskih spremnika na dan unaprijed tržištu električne energije. Nadalje, biti će prikazan optimizacijski model agregatora umreženih baterijskih spremnika za davanje optimalne ponude na tržištu električne energije s ciljem maksimizacije zarade prema očekivanim tržišnim cijenama električne energije na CROPEX-u. Unutar MATLAB programskog paketa biti će izvršene simulacije tog optimizacijskog modela.

Prvo poglavlje diplomskog rada je uvod, a zatim će biti opisan teorijski dio i simulacije optimizacijskog modela. U drugom poglavlju je dan pregled literature. Treće poglavlje opisuje baterijske spremnike te je dan primjer jednog takvog spremnika. U četvrtom poglavlju je opisano tržište električne energije, a u petom je dan opis i matematički zapis optimizacijskog modela. Šesto poglavlje obuhvaća simulacije optimizacijskog modela te konačno u zadnjem poglavlju je zaključak s osvrtom na simulacije te općenito cijeli diplomski rad.

## **2. PREGLED LITERATURE**

Baterijski spremnici većih snaga su novija tehnologija stara tek nekoliko godina pa postoji manjak literature u tom području. Opis baterijski spremnika kao nove tehnologije je prikazan u literaturi [1]. Pregled tehnologija spremnika električne energije i primjena baterija u elektroenergetskom sustavu je opisana u [2]. Literatura [3] prikazuje trenutno stanje baterijskih spremnika u svijetu te njihovu budućnost. Tesla, kao jedan od najvećih proizvođača baterijskih spremnika, ima veliku konkurentnost na tržištu. Značajke i prednosti njihovih baterija su opisane u [4] dok su njihovi važniji projekti prikazani u [5]. Primjer najvećeg baterijskog spremnika na svijetu snage 100 MW/ 129 MWh je opisan u literaturi [6], a zarada koju ta baterija ostvaruje je navedena u [7]. Vrste tržišta električne energije su naveden u [8] kao i način trgovanja na tim tržištima u Hrvatskoj. Literatura [9] prikazuje hrvatsku burzu električne energije. Sve cijene upotrebljavane u diplomskom radu su preuzete iz [9].

### 3. BATERIJSKI SPREMNICI

Razvojem obnovljivih izvora energije kao što su vjetroelektrane i fotonaponske elektrane dolazi i do razvoja baterijskih spremnika. Baterije sve više postaju važan dio elektroenergetskog sustava kao samostalni elementi koji će se puniti iz mreže te po potrebi prazniti, čime je smanjenja nepredvidljivost proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora. Skladištenje električne energije je već u dužoj uporabi i to u obliku pumpno-akumulacijskih hidroelektrana, ali uvođenje baterija je postalo privlačno zbog pada cijena, brzog odziva i modularnosti baterija [1]. Također, obnovljivi izvori uzrokuju promjene tokova snaga, pogonskih događaja, porast napona na dugim priključnim vodovima, sve to znači složenije vođenje pogona i održavanje mreže za operatora, a kao moguće rješenje smatra se upotreba baterijskih spremnika [2].

Prema podacima globalne baze podataka za pohranu energije (engl. *Global energy storage database*) 2017. u svijetu je postojalo 725 projekata za pohranu električne energije s kapacitetom od 1500 MW, a predviđa se da će do 2022. ukupni instalirani kapacitet baterijskih spremnika iznositi 14000 MW [3].

U tablici 3.1 dan je pregled tehnologija spremnika električne energije s obzirom na:

- Snagu
- Gustoću energije
- Vrijeme pražnjenja
- Vrijeme odziva
- Samopražnjenje
- Učinkovitost

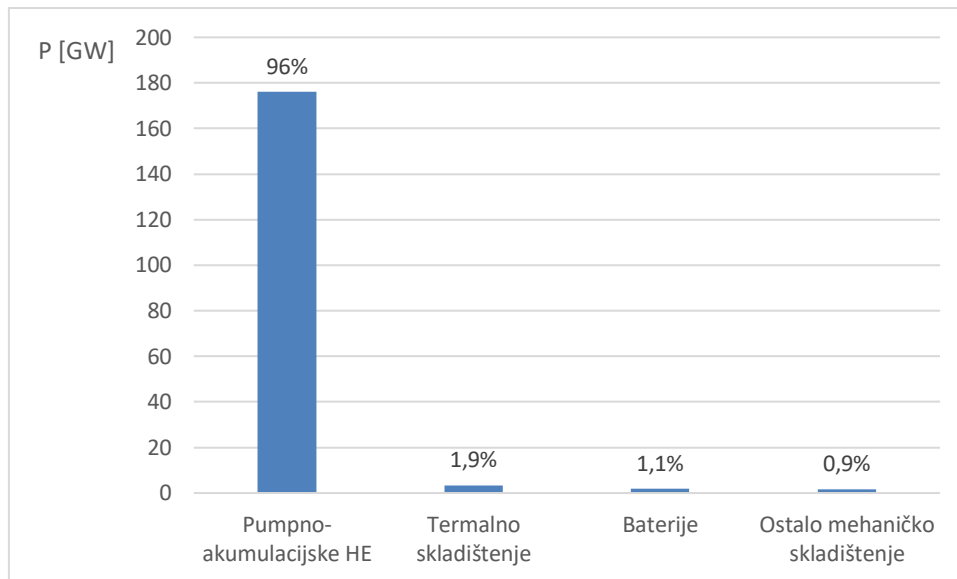
Prema [2], „Gustoća energije predstavlja količinu energije koja se može pohraniti u kilogramu ili kubnom metru spremnika, bitna je za dimenzioniranje prostora za smještaj spremnika“.

Tablica 3.1. Pregled tehnologija spremnika električne energije [2]

<b>Tehnologija</b>	<b>Snaga [MW]</b>	<b>Gustoća energije [Wh/dm<sup>3</sup>]</b>	<b>Vrijeme pražnjenja</b>	<b>Vrijeme odziva</b>	<b>Samopražnjenje</b>	<b>Učinkovitost [%]</b>
Crpno – akumulacijske hidroelektrane	100 - 3.000	0,2 - 2	1-24 h+	minute	malo	70 - 85
Sustavi pohrane energije komprimiranim zrakom	do 300	2 – 6	1-24 h+	minute	malo	40 – 70
Pohrana energije pomoću zamašnjaka	0,1 - 20	20 - 80	1 s – 15 min	sekunde	veliko	85 – 95
Baterijski sustavi za pohranu električne energije	0 - 50	20 - 400	1 min– 24h+	ms	malo - umjereno	60 – 80
Proizvodnja i skladištenje vodika (gorivi članci)	do 60	600	1 min- 24h+	sekunde	malo	30 – 40
Superkondenzator	0 – 0,3	10 - 20	1 ms – 1 min	ms	veliko	84 - 97
Toplinski sustavi za pohranu energije	0,1 - 250	80 - 250	1 h – 10 h	minute	veliko-umjereno	30 – 60

Kod baterijskih spremnika može se vidjeti da snage mogu biti od nekoliko kW do nekoliko desetaka MW. Gustoća energije je vrlo velika što znači da se u malim baterijama mogu skladištiti velike količine energije. Vrijeme pražnjenja može biti od 1 minute pa sve do više od 24 sata, ovisno o potrebi, a vrijeme odziva je u ms. Učinkovitost baterijskih spremnika se kreće od 60% do 80%.

Na slici 3.1 su prikazane vrste tehnologija za skladištenje električne energije te njihova iskorištenost u odnosu na druge. Pumpno-akumulacijske hidroelektrane imaju znatno veću primjenu u odnosu na ostale vrste spremnika, ali to je i ujedno najstarija tehnologija od navedenih. Iako baterije zauzimaju tek 1,1% od ukupnog skladištenja energije, ova tehnologija ima velik potencijal da se ta brojka znatno poveća.



Slika 3.1 Vrste i količine skladištenja energije



### 3.1 VRSTE BATERIJSKIH SPREMNIKA

Postoje razne izvedbe baterija s različitim funkcijama, stoga je pri odabiru baterije potrebno obratiti pažnju na te funkcije i ulogu u elektroenergetskom sustavu. Neke od značajki koje su bitne za odabir baterije su dugotrajnost, korisnost, vrijeme punjenja i pražnjenja, radna temperatura i sl. Najčešće vrste baterija koje se koriste su:

- Olovne
- NiCd – Nikal-kadmij
- Li-ion – Litij-ion
- NaS – Natrij-Sumpor
- ZEBRA – Natrijev-nikla klorid
- VRB – Vanadij redoks
- ZnBr – Cink-brom

U tablici 3.2 je prikazan pregled tih vrsta baterija s usporedbama osnovnih značajki te njihovom cijenom. Najčešće upotrebljavana baterija je litij-ion zbog visoke korisnosti, niske radne temperature, velikog nazivnog napona članka te naravno zbog relativno niske cijene u odnosu na ostale tehnologije. Kako su cijene baterija vrlo visoke, čak do 4000 €/kW, vrlo je bitno proučiti sve zahtjeve na koje baterija treba odgovarati i odabrati optimalnu opciju.

Tablica 3.2 Pregled osnovnih značajki i cijena različitih izvedbi baterija [2]

	Olovne	NiCd	Li-ion	NaS	ZEBRA	VRB	ZnBr
<b>TEHNIČKE ZNAČAJKE</b>							
Dugotrajnost	≤20 god.	20+ god.	≤10 god.	≤15 god.	≤15 god.	≤20 god.	≤10 god.
Broj ciklusa	200-1.000	1.000-3.500	1.000-2.000	4.000-5.000	4.000-5.000	>12.000	2.000-3.000
Gustoća energije (Wh/kg)	15-40	15- 40	70 – 250	100-120	100-120	50	75-85
Nazivni napon članka (V)	2	1,2	2,4 - 3,7	2	2,5	1,2	1,8
Korisnost (%)	70-82	60-70	>90	80-90	85-95	70-85	60-75
Vrijeme punjenje / pražnjenje	5 / 1	1 / 1	1 / 1	1 / 1	1 / 1	1 / 1	1 / 1
Vrijeme odziva	<1 ms	<1ms	<1 ms	5 ms	5 ms	5 ms	5 ms
Samopražnjenje (%/dan)	0,033-0,3	0,067-0,6	≤ 0,1	0 (nova)	0	malo	veliko
Radna temperatura (°C)	-10 – +40	-40 – +50	-20 – +60	+310 - +350	+310 - +350	+20 - +40	+20 - +50
Pogodne za snage (MW)	≤10	< 30	≤ 2	≤ 50	≤ 5	≤ 15	≤1
Vrijeme pražnjenja	do 5 h	< 1 h	≤ 2 h	2-8 h	2-8 h	4-8+ h	2-4 h
<b>RASPON CIJENA</b>							
Cijena baterije (€/kW)	100-500	400-900	150 - 1.000	3.000-4.000	150-1.000	500-1.300	300-700
Cijena baterije (€/kWh)	100-200	450-1.100	700 - 1.300	400-600	550-750	100-400	450-550

## 3.2 BATERIJSKI SPREMNIK TESLA MEGAPACK

Kompanija Tesla postala je jedna od vodećih u proizvodnji i instaliranju baterijskih spremnika električne energije velikih snaga. Glavni cilj Teslinih baterijskih spremnika je smanjenje emisije ugljikovog dioksida. Prvotno je zamišljena kao baterija manjih snaga (oko 10 kWh) no povećanjem energetske potreba i mogućnošću ostvarivanja većeg profita te snage su počele rasti. Tesla u planu ima u bliskoj budućnosti početi praviti baterije s kapacitetom skladištenja energije u GWh pri čemu će baterije zauzimati 40% manje prostora, a imati će isti kapacitet skladištenja [4].

Primjena:

- izravnavanje dnevnog dijagrama opterećenja
- odgoda nadogradnje zastarjele infrastrukture
- stabilnost napona
- mikromreže
- sudjelovanje na tržištu
- regulacija frekvencije [4].

Punjenjem baterije pri manjim energetske potrebama potrošača, a pražnjenjem pri vršnim opterećenjima dobivamo ujednačeniji izgled dnevnog dijagrama opterećenja. Ako se baterija postavi na mjestu gdje potrošači mogu direktno koristiti uskladištenu energiju, mogu se izbjeći skupe nadogradnje infrastrukture elektroenergetskog sustava. Injektiranjem ili apsorpcijom jalove snage u ili iz baterije postiže se naponska stabilnost u mreži. Ugradnjom baterije zajedno s elektranom na obnovljive izvore energije može se postići neovisnost o elektroenergetskom sustavu tj. mikromreža. Brzim punjenjem ili pražnjenjem baterije može se postići frekvencijska stabilnost u mreži.

Važniji projekti:

- 100 MW/ 129 MWh Hornsdale, Australija (najveći sustav baterijskih spremnika na svijetu)
- 6 MW/ 48 MWh Nantucket, SAD
- 25 MW/ 50 MWh Victoria, Australija
- 212 kW/ 840 kWh Južna Dakota, SAD
- 4 MW/ 16 MWh Weld County, Colorado, SAD

- 350 kW/ 420 kWh Florida, SAD
- 25 MW/ 52 MWh Lake Booney, Australija
- 1,4 MW/ 6 MWh Samoa
- 10 MW Arizona, SAD
- 18,2 MW Terhills, Belgija
- 2 MW, tvornica Ardagh Irvine, Škotska
- 2 MW/ 2 MWh Palun, Filipini. [5]

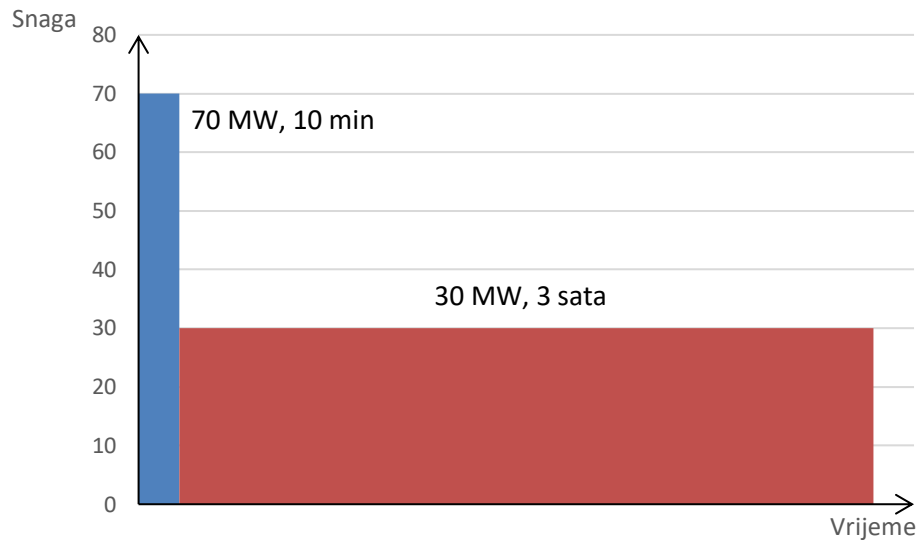
### 3.2.1 Hornsdale baterijski spremnik

Hornsdale je smješten u regiji Južne Australije te se tamo nalazi najveća litij-ionska baterija na svijetu, snage 100 MW/ 129 MWh. Baterija zauzima površinu od jednog hektara, a smještena je u sklopu Hornsdale vjetroparka, trenutno najveće elektrane na obnovljive izvore u Južnoj Australiji, što je prikazano na slici 3.2 [6].



Slika 3.2 Hornsdale baterijski spremnik [7]

Cilj tog projekta je osigurati stabilnost elektroenergetskog sustava Južne Australije i smanjiti proizvodnju električne energije iz elektrana na fosilna goriva. 70% energije baterije se koristi za održavanje stabilnosti napona i frekvencije elektroenergetskog sustava, a 30% se koristi isključivo za trgovanje električnom energijom kao što je prikazano na slici 3.3.



Slika 3.3 Dijagram snage i trajanje dva segmenta baterije

Projekt je pušten u pogon 1.12.2017. a pražnjenjem pri vršnim opterećenjima baterija ima mogućnost napajanja 30000 domaćinstava [6]. Hornsdale baterijski spremnik je koštao oko 90.000.000,00 dolara, a tijekom 2018. baterija je ostvarila profit od 4.200.000,00 dolara trgovanjem električne energije te dodano 24.000.000,00 dolara od pružanja mrežnih usluga [7]. U tablici 3.3 je prikazano punjenje i pražnjenje baterije za jedan dan trgovanja električnom energijom na tržištu. Baterija se puni ili prazni svakih 5 minuta dok je u tablici prikazano po satima samo zbog preglednosti pa tako je u jednom satu moguće pražnjenje i punjenje. Zarada trgovanjem električne energije bez pružanja mrežnih usluga za 2.6.2020. iznosi 1.019,59 dolara.

Tablica 3.3 Punjenje i pražnjenje baterije dana 2.6.2020.

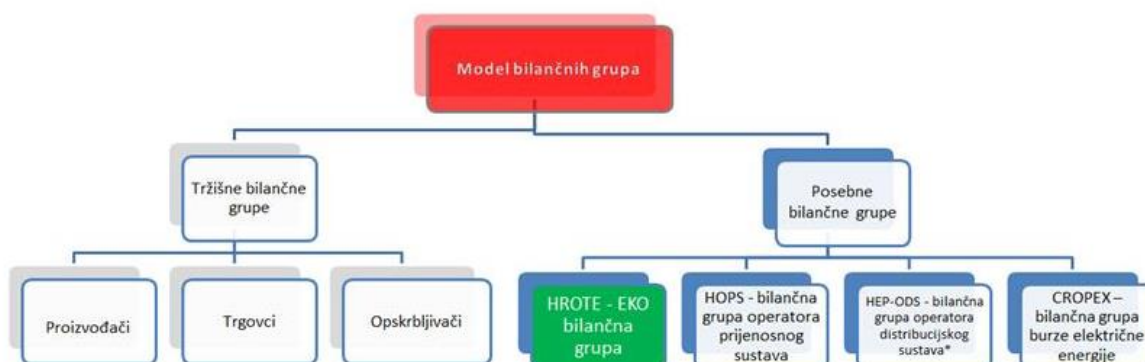
Sati	Punjenje [MWh]	Pražnjenje [MWh]	Prodaja/kupovina	Zarada
1	0	1,42	\$ 51,66	\$ 1.019,59
2	0,42	2,42	\$ 73,94	
3	6,08	1,50	\$ -112,26	
4	21,58	0	\$ -103,75	
5	13,08	0	\$ -127,84	
6	7,33	1,67	\$ -17,04	
7	2,08	7,5	\$ 193,74	
8	0,42	3,5	\$ 190,07	
9	0	6,83	\$ 444,81	
10	0	10,67	\$ 484,34	
11	0	8,15	\$ 307,96	
12	2,08	2,58	\$ 28,99	
13	0,33	0	\$ -9,11	
14	0,25	5,67	\$ 172,22	
15	4,67	1,67	\$ -96,39	
16	1,25	4,75	\$ 148,00	
17	4,5	6,17	\$ 70,48	
18	10,17	5,33	\$ -125,50	
19	0,17	1,75	\$ 94,37	
20	6,08	3,17	\$ -106,79	
21	2,5	9,83	\$ 237,62	
22	4,33	0	\$ -155,45	
23	8,67	0,58	\$ -338,04	
24	10,92	2,25	\$ -286,44	

## 4. TRŽIŠTE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Trgovanje električnom energijom, s ekonomskog gledišta, predstavlja jedini način dovođenja u vezu ponudu i potražnju za električnom energijom. Takav način trgovanja je vrlo sličan trgovanju bilo kakvom robom. Tržišne sudionike čine kupci, grupa koja određuje potražnju i prodavači, grupa koja određuje ponudu električne energije. Prema [8], „U Hrvatskoj postoje dva tržišta električne energije:

- model bilateralnog tržišta,
- organizirano tržište električne energije (CROPEX). “

U počecima otvaranja tržišta električne energije u Hrvatskoj korišten je samo bilateralni model koji je nadograđen modelom bilančnih grupa. Struktura modela bilančnih grupa prikazana je na slici 4.1.



Slika 4.1 Struktura modela bilančnih grupa [8]

U [8] se navodi, „Bilateralni ugovori se sklapaju između opskrbljivača, trgovca ili proizvođača.“ Opskrbljivač i kupac predstavljaju ugovorne strane u bilateralnom ugovoru. Kupci i proizvođači moraju još sklopiti ugovor s HOPS-om ili HEP-om, ovisno o naponskoj razini na koju se krajnji kupci priključuju.

## 4.1 CROPEX

Tržište električne energije u Hrvatskoj odvija se preko Hrvatske burze električne energije, CROPEX (engl. *Croatian power exchange*). Prema [9], „Hrvatska burza električne energije osnovana je u cilju osiguranja središnjeg mjesta za organiziranu, sigurnu, anonimnu i razvidnu trgovinu električnom energijom između tržišnih sudionika, članova burze“. Skupštinu CROPEX-a čine hrvatski operator tržišta električne energije (HROTE) s udjelom od 50% i hrvatski operator prijenosnog sustava (HOPS) također s udjelom od 50%.

U [9] se navodi, „Članovi burze mogu biti svi tržišni sudionici koji imaju pravo trgovati na području Republike Hrvatske.“ Postoje dva osnovna načina trgovanja na burzi na području Republike Hrvatske:

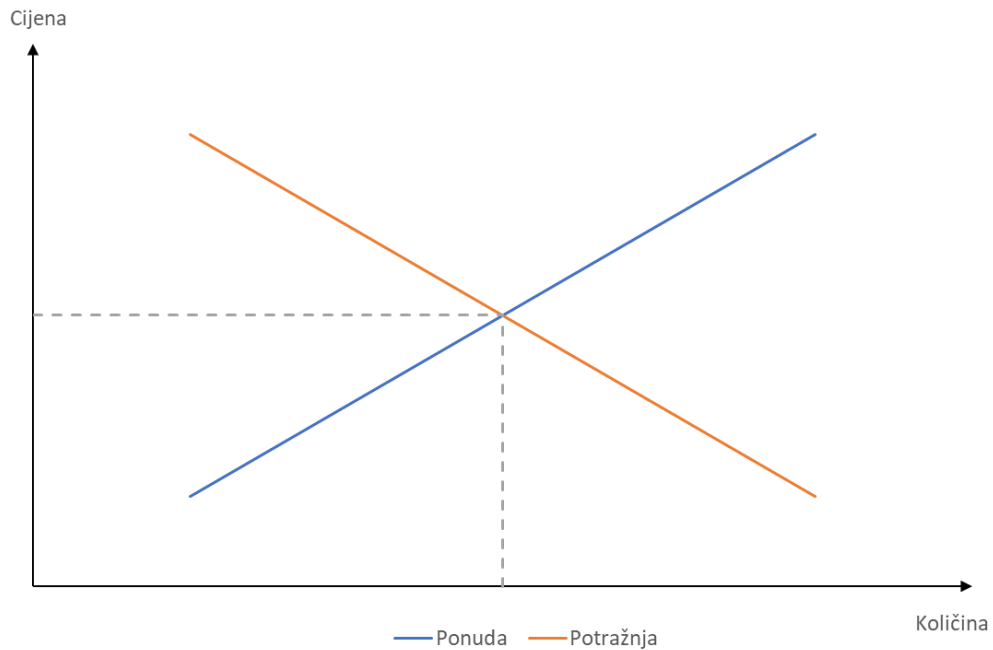
- Dan unaprijed tržište
- Unutardnevno tržište

### 4.1.1 Dan unaprijed tržište

Dan unaprijed tržište se provodi kroz dražbu gdje prodavači daju ponude za svaki sat idućeg dana, a u obzir se uzimaju ponude koje su pristigle do 10 sati, a nakon toga roka preuzimaju se ponude za dan nakon toga. Na temelju naloga kupovine i prodaje za svaki sat formira se sumarna krivulja ponude i sumarna krivulja potražnje, čime se određuje jedinstvena cijena električne energije svakog sata.

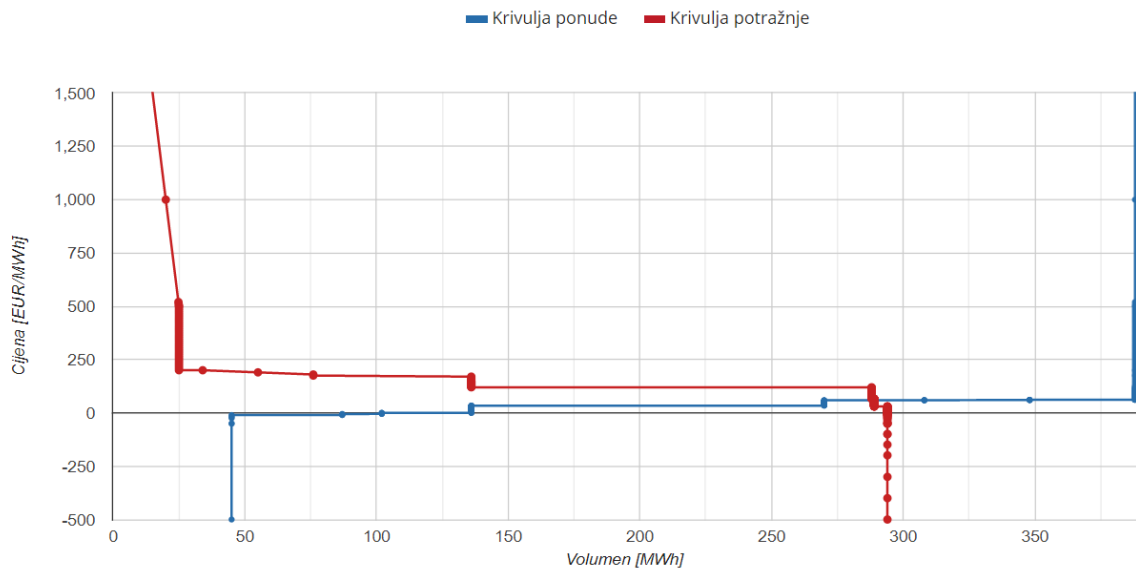
Za izračun cijene koristi se pravilo marginalne odnosno jedinstvene cijene kao što je prikazano na slici 4.2. Marginalna cijena se nalazi u točki gdje se presijecaju ponuda i potražnja električne energije. U toj točki je tržište u ravnoteži te ima svoju ravnotežnu cijenu i ravnotežnu količinu.





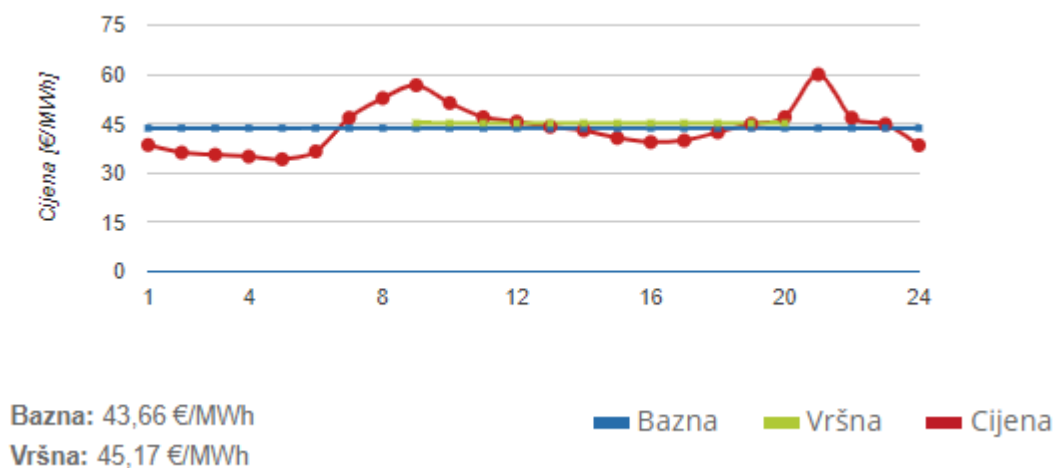
Slika 4.2. Određivanje marginalne cijene

Kada se zaprimе svi nalozi za prodaju i kupnju električne energije formira se sumarna krivulja ponude i krivulja potražnje. Takva krivulja se pravi za svaki sat jer nalozi prodaje i kupnje zaprimaju za svaki sat pojedinačno. Sjecište tih dvaju krivulja predstavlja marginalnu cijenu po kojoj će se trgovati toga sata te količinu električne energije koja će biti na tržištu kao što je prikazano na slici 3.3. Krivulja na slici 4.3 prikazuje određivanje marginalne cijene na tržištu dan unaprijed za dan 29.4.2019. u razdoblju od 19-20 sati. Volumen koji će se trgovati tog sata iznosi 289 MWh po cijeni od 47 €/MWh. Sve ponude koje zadovoljavaju ove uvjete cijene i volumena biti će uzete u obzir i njima će se trgovati po marginalnoj cijeni. Ovakav način trgovanja se naziva pool model tržišta i predstavlja uređen način trgovanja gdje tržišni operator na temelju ponuda potražnje i ponuda proizvodnje te jasno određenih pravila odlučuje tko će kupiti, a tko prodati električnu energiju.

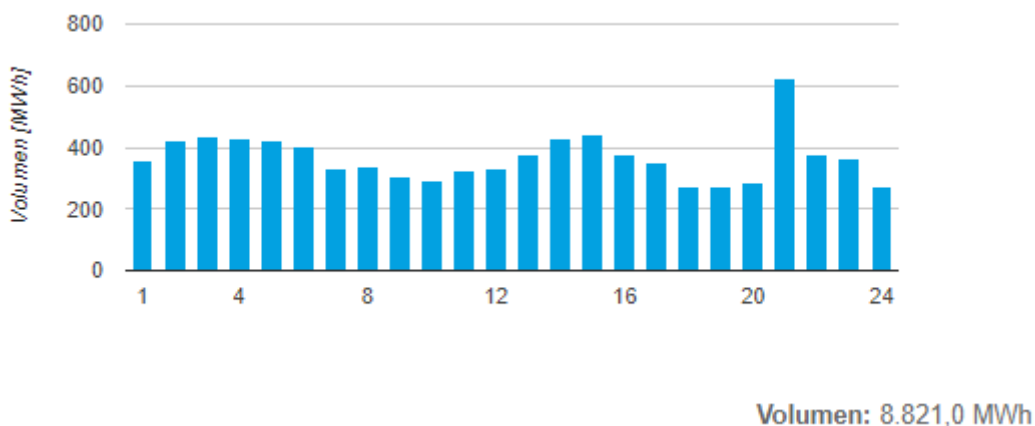


Slika 4.3 Određivanje marginalne cijene za dan 29.4.2019. između 19-20 sati [9]

Kako cjenovna krivulja najčešće prati promjenu dnevnog dijagrama opterećenja, što je prikazano na slici 4.4, možemo zaključiti da je električnu energiju najprofitabilnije prodavati u jutarnjim satima (od 6:00 do 10:00) i večernjim satima (od 18:00 do 23:00). Na slici 4.5 prikazane su dostavljene količine električne energije od strane prodavača. Ukupni volumen 29.4.2019. električne energije iznosio je 8821 MWh, pa jednostavnom računom možemo zaključiti da je ukupna cijena električne energije tog dana bila 385.099,56 €. Ako želimo ostvariti što veći profit bateriju ćemo puniti u razdoblju kada je električna energija jeftinija, odnosno noću, a prodavati je u vrijeme kada je najskuplja tj. u prethodno navedenim jutarnjim i večernjima satima.

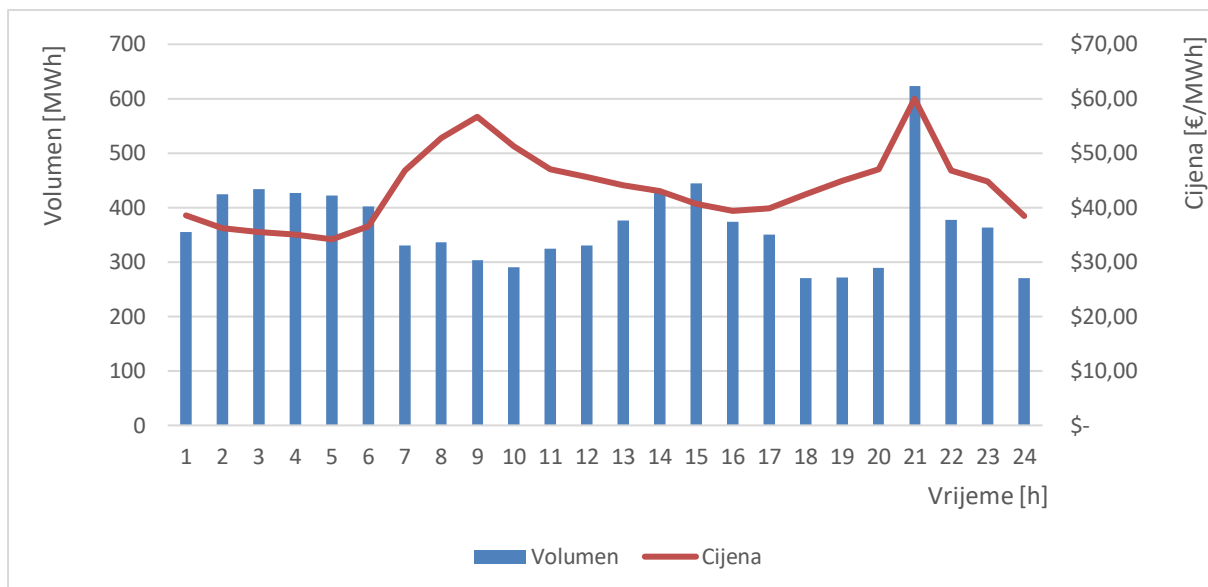


Slika 4.4 Dijagram promjene cijene električne energije za dan 29.4.2019. [9]



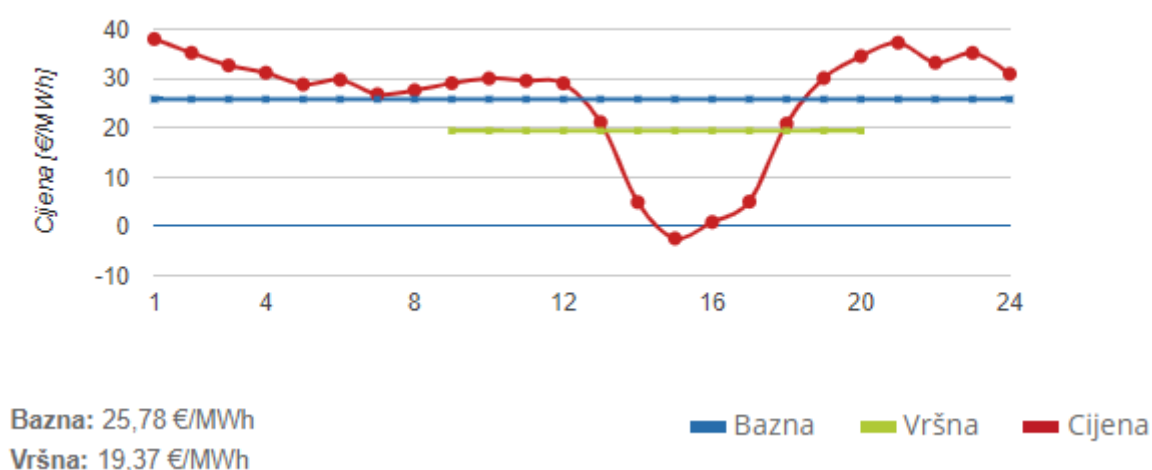
Slika 4.5 Dijagram dostavljene količine električne energije za dan 29.4.2019. [9]

Slika 4.6 prikazuje kako se mijenja cijena s promjenom dostavljene količine električne energije na tržištu dan unaprijed. Cijena se uvijek formira na osnovu zakona ponude i potražnje pa tako smanjenjem volumena povećava se cijena i obrnuto. Na slici je još vidljivo da u razdoblju od 20:00 do 21:00 cijena električne energije se povećala iako je volumen u tom satu najveći. Razlog tome je dnevni dijagram opterećenja, odnosno zato što je tada bila najveća potreba za električnom energijom.



Slika 4.6 Dijagram ovisnosti cijene električne energije o volumenu

Postoji mogućnost da u određeno vrijeme cijena električne energije bude negativna, što znači da prodavači moraju platiti dostavljenu količinu energije, kao što je vidljivo na slici 4.7 u razdoblju od 14:00 do 15:00. Razlog ovakve situacije je zakon ponude i potražnje, velika količina električne energije je proizvedena, a mala potrošnja. Takav slučaj je najčešći kada su troškovi obustave elektrane i dovođenja ponovno u pogon veći nego da prodavači plate količinu električne energije koju će dostaviti. Ovakve situacije su rijetke i vrlo teške za predvidjeti i događaju se kod baznih elektrana.



Slika 4.7 Dijagram promjene cijene električne energije za dan 1.5.2019. [9]

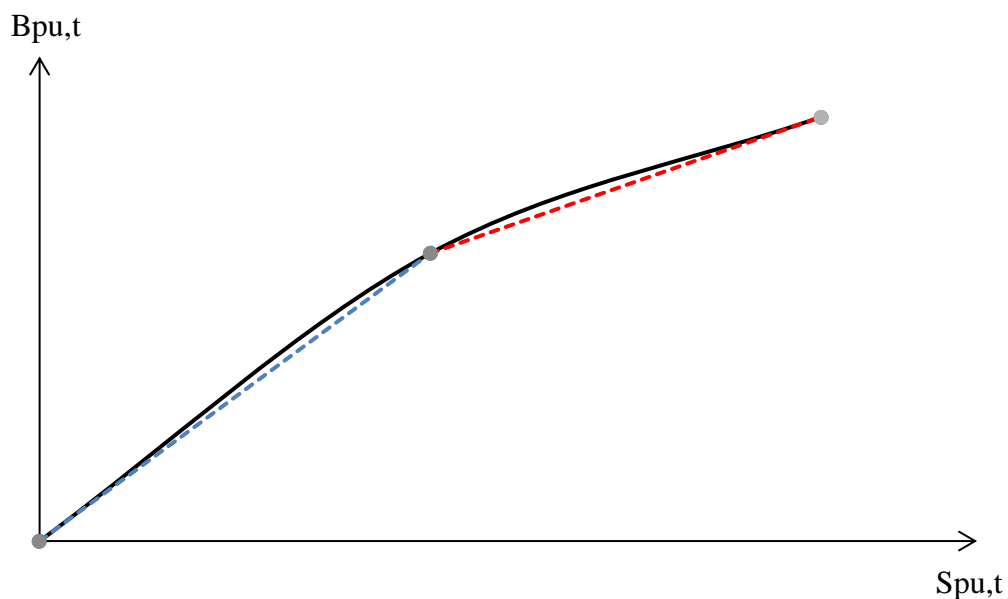
Prema podacima CROPEX-a za trgovanje električnom energijom u siječnju i veljači 2020. postoji 20 članova koji sudjeluju na dan unaprijed tržištu električne energije. Ukupna razmjena električne energije u siječnju 2020. je bila 620583,0 MWh od čega je na danu unaprijed tržištu 599376,9 MWh. U tablici 4.1 je prikazan pregled trgovanja na dan unaprijed tržištu u siječnju 2020.

Tablica 4.1 Trgovanje na dan unaprijed tržištu za siječanj 2020.

<b>Siječanj 2020</b>	<b>Dnevni prosjek</b>	<b>Dnevni minimum</b>	<b>Dnevni maksimum</b>	<b>Ukupno</b>
Volumen [MWh]	19334,70	135219,20	28023,60	599376,90
Cijena [€/MWh]	51,32	32,26	87,58	-

## 5. OPTIMIZACIJSKI MODEL

U sklopu optimizacijskog modela prikazat će se funkcija cilja, ograničenja te limiti varijabli. Kako krivulje punjenja odnosno pražnjenja baterije nisu linearne već ovise o faktoru učinkovitosti punjenja/pražnjenja, biti će linearizirane na dva segmenta, kao što je prikazano na slici 5.1. Prvi segment će imati veći faktor učinkovitosti od drugog segmenta. Kao i kod svake baterije, porastom stanja napunjenosti smanjuje se učinkovitost punjenje baterije. Isti slučaj vrijedi i za pražnjenje, kada baterija dosegne određenu vrijednost napunjenosti faktor učinkovitosti pražnjenja se smanjuje. Ta vrijednost je prikazana kao granica između dva segmenta gdje se učinkovitost punjenja odnosno pražnjenja smanjuje. Na slici je prikazana samo linearizacija krivulje punjenja, ali ista krivulja se može primijeniti kod pražnjenja baterije. Model je napravljen tako da se maksimizira zarada između kupovine i prodaje električne energije što znači da baterija ne mora doseći maksimalnu razinu napunjenosti tijekom dana te da u jednom satu se možda neće koristiti oba segmenta već samo onaj s većim faktorom učinkovitosti bilo punjenja ili pražnjenja. Ponude kupovine i prodaje električne energije će se razmatrati na dan unaprijed tržištu.



Slika 5.1 Linearizacija krivulje punjenja baterije

## 5.1 OPIS OPTIMIZACIJSKOG MODELA

Funkcija cilja odnosi se na maksimizaciju dobiti na tržištu dan unaprijed prema očekivanim cijenama u vremenu  $t$  plus količina električne energije pohranjene u baterijskom spremniku na kraju promatranog razdoblja. Ponuda količine električne energije na tržištu dan unaprijed može biti pozitivna ili negativna. Negativan predznak predstavlja kupovnu ponudu, a pozitivan predznak prodajnu ponudu.

Ograničenja su predstavljena u obliku balansa energije te ovisnosti između napunjenosti baterijskog spremnika o snazi odnosno energiji punjenja i pražnjenja. Balans energije označava omjer energije punjenja ili pražnjenja o količini električne energije na tržištu. Razlika energija pražnjenja i punjenja baterijskog spremnika u nekom satu  $t$  jednaka je količini električne energije koju ćemo kupiti ili prodati na dan unaprijed tržištu. Kada promatramo energiju koja je ispražnjena iz baterije ili energiju kojom je baterija napunjana, moramo uvesti faktor učinkovitosti pražnjenja/punjenja. Taj faktor se odnosi na razne gubitke u procesu pretvorbe izmjenične električne energije u istosmjernu i obrnuto te gubitke samog baterijskog spremnika. Umnožak tog faktora i energije pražnjenja/punjenja baterije predstavlja realnu količinu energije kojom se baterija ispraznila/napunila u satu  $t$ . Stanje napunjenosti baterije se promatra u dva slučaja, a to su stanje napunjenosti baterije na početku promatranog razdoblja tj.  $t=1$  i stanje napunjenosti na kraju promatranog sata  $t$  koji mora biti veći od 1.

Postoje tri limita varijabli u ovome optimizacijskom modelu. Prva dva limita se odnose na maksimalnu snagu punjenja/pražnjenja, koja se nalazi između nule te određene maksimalne vrijednosti snage za promatrani segment. Treći limit pokazuje granice stanja napunjenosti baterijskog spremnika.

## 5.2 MATEMATIČKI ZAPIS OPTIMIZACIJSKOG MODELA

Funkcija cilja:

$$\max \sum_{t=1}^{n_t} \lambda_t P_{du_t} + SOC_{n_t} \cdot \lambda_t \quad 4-1$$

gdje je:

- $\lambda_t$  – očekivana satna cijena na tržištu dan unaprijed
- $P_{du_t}$  – satna ponuda na tržištu dan unaprijed
- $n_t$  – period simulacije

Stanje napunjenosti baterijskog spremnika:

$$SOC_{n_t} = SOC_{end} \quad 4-2$$

gdje je:

- $SOC_{end}$  – stanje napunjenosti baterijskog spremnika na kraju promatranog razdoblja t

Ograničenja, balans energije:

$$S_{pr_t} - S_{pu_t} = P_{du_t} \quad 4-3$$

gdje je:

- $S_{pr_t}$  – energija pražnjenja baterijskog spremnika u satu t, pri konstantnoj snazi pražnjenja  $S_{pr}$  u satu t
- $S_{pu_t}$  – energija punjenja baterijskog spremnika u satu t, pri konstantnoj snazi punjenja  $S_{pu}$  u satu t

$$S_{pr_t} = \sum_{i=1}^{n_{spr}} S_{pr_{i,t}} \quad 4-4$$

$$S_{pu_t} = \sum_{i=1}^{n_{spu}} S_{pu_{i,t}} \quad 4-5$$



gdje je:

- $n_{spr}$  – broj segmenata snage punjenja
- $n_{spu}$  – broj segmenata snage punjenja
- $S_{pr_{i,t}}$  – segment snage pražnjenja
- $S_{pu_{i,t}}$  segment snage punjenja

$$B_{pr_t} = \sum_{i=1}^{n_{spr}} \frac{1}{\mu_{pr_i}} S_{pr_{i,t}} \quad 4-6$$

$$B_{pu_t} = \sum_{i=1}^{n_{spu}} \mu_{pu_i} \cdot S_{pu_{i,t}} \quad 4-7$$

gdje je:

- $B_{pr_t}$  – energija ispražnjena iz baterije u satu t
- $B_{pu_t}$  – energija kojom se baterija napunila u satu t
- $\mu_{pr_i}$  – učinkovitost pražnjenja baterijskog spremnika u segmentu i
- $\mu_{pu_i}$  – učinkovitost punjenja baterijskog spremnika u segmentu i

Stanje napunjenosti baterijskog spremnika:

$$SOC_t = SOC_{start} - B_{pr_t} + B_{pu_t} \text{ za } t = 1 \quad 4-8$$

$$SOC_t = SOC_{t-1} - B_{pr_t} + B_{pu_t} \text{ za } t > 1 \quad 4-9$$

gdje je:

- $SOC_t$  – stanje napunjenosti baterijskog spremnika na kraju sata t
- $SOC_{start}$  – stanje napunjenosti baterijskog spremnika na početku promatranog razdoblja

Limiti varijabli;

- Maksimalna snaga pražnjenja baterijskog spremnika u segmentu i:

$$0 \leq S_{pr_{i,t}} \leq S_{pr,max_i} \quad 4-10$$

- Maksimalna snaga punjenja baterijskog spremnika u segmentu i:

$$0 \leq S_{pu_{i,t}} \leq S_{pu,max_i} \quad 4-11$$

- Stanje napunjenosti baterijskog spremnika:

$$SOC_{min} \leq SOC_t \leq SOC_{max} \quad 4-12$$

gdje je:

- $SOC_{min}$  – minimalno stanje napunjenosti baterijskog spremnika
- $SOC_{max}$  – maksimalno stanje napunjenosti baterijskog spremnika

## 6. SIMULACIJE

Analiza modela je napravljena u programskom paketu MATLAB gdje je postavljena funkcija cilja, ograničenja te limiti varijabli. Unutar modela se brzo mogu promijeniti potrebni ulazni parametri tako da se razne simulacije dobiju u vrlo kratkom vremenskom razdoblju. Cijene električne energije koje se nalaze u modelu su preuzete sa CROPEX-a na dan unaprijed tržištu.

U analizi će biti prikazano kako se mijenja ostvareni profit promjenom efikasnosti punjenja i pražnjenja baterije po segmentima. Također, kako se promjenom buduće cijene mijenja stanje napunjenosti baterije na kraju dana i profit ostvaren u razdoblju od dva dana. Biti će dan pregled korištenja baterije tijekom cijelog mjeseca uz odgovarajuće tablice i dijagrame.

### 6.1 SIMULACIJA PROCESA TIJEKOM ČETIRI DANA

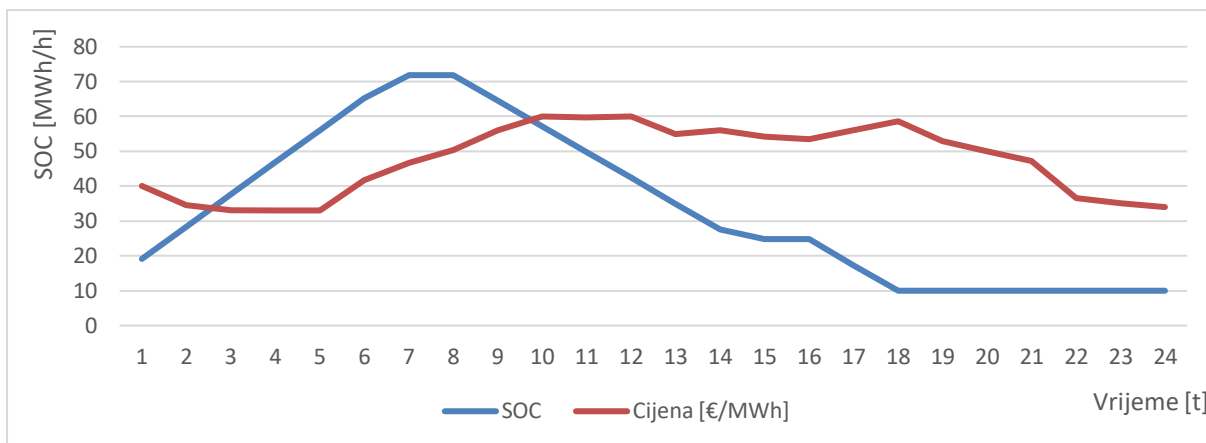
Simulacija će obuhvatiti dane od petka do ponedjeljka pa će biti prikazano koliko se može zaraditi punjenjem i pražnjenjem baterije vikendom, a koliko radnim danom. Ova simulacija tijekom četiri dana od 13. prosinca do 16. prosinca 2019. prikazati će samo osnove modela odnosno kako se baterija puni ili prazni tijekom dana ovisno o cijeni električne energije. Unutar modela biti će uzeta u obzir buduća cijena električne energije odnosno cijena energije koja će biti idući dan u ranijim satima. Time se postiže maksimizacija zarade tako da se baterija puni tekućeg dana pri nižim cijenama električne energije, a prazni se idući dan ako cijena bude viša.

Postavljeno je ograničenje minimuma napunjenosti baterije na 10 MWh čime bi se produžio vijek trajanja baterije pa je tako i početna vrijednost napunjenosti baterije 10 MWh kao što je prikazano u tablici 6.1. U tablici je također prikazano stanje napunjenosti baterije (SOC), cijena električne energije tijekom svakog sata, punjenje i pražnjenje baterije pri čemu punjenje ima negativan predznak, zarada svakog sata te ukupan profit koji se može ostvariti 13. prosinca 2019. Trgovanje električne energije na CROPEX-u se vrši u eurima pa su tako i u svim simulacijama cijene izražene u eurima. Ukupan profit ostvaren 13. prosinca 2019. iznosi 896,17 €.

Tablica 6.1 Rezultati trgovanja električnom energijom dana 13.12.2019.

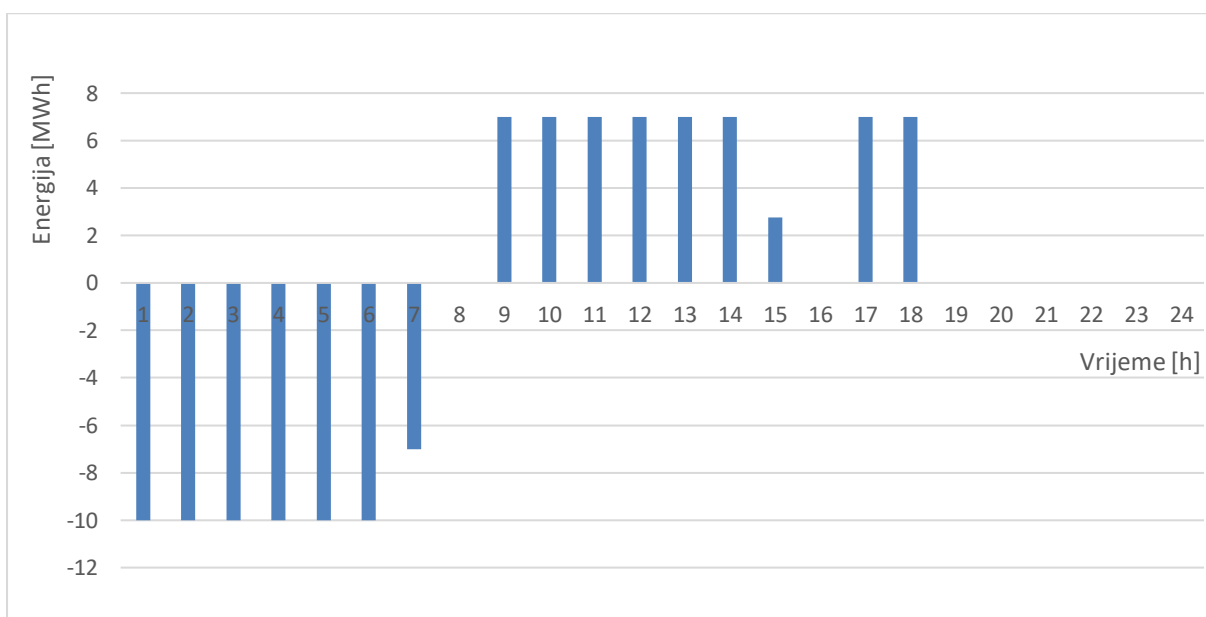
Sat	SOC [MWh/h]	Cijena [€/MWh]	Punjenje/ pražnjenje [MWh]	Zarada [€]	Ukupno [€]
Start	10				\$ 896,17
1	19,20	40,11	-10,00	\$ -401,10	
2	28,40	34,55	-10,00	\$ -345,50	
3	37,60	33,08	-10,00	\$ -330,80	
4	46,80	33,03	-10,00	\$ -330,30	
5	56,00	33,03	-10,00	\$ -330,30	
6	65,20	41,81	-10,00	\$ -418,10	
7	71,85	46,60	-7,00	\$ -326,20	
8	71,85	50,44	0,00	-	
9	64,48	56,00	7,00	\$ 392,00	
10	57,11	60,00	7,00	\$ 420,00	
11	49,74	59,63	7,00	\$ 417,41	
12	42,38	60,00	7,00	\$ 420,00	
13	35,01	55,00	7,00	\$ 385,00	
14	27,64	56,00	7,00	\$ 392,00	
15	24,74	54,22	2,76	\$ 149,51	
16	24,74	53,48	0,00	-	
17	17,37	56,01	7,00	\$ 392,07	
18	10,00	58,64	7,00	\$ 410,48	
19	10,00	53,01	0,00	-	
20	10,00	50,00	0,00	-	
21	10,00	47,18	0,00	-	
22	10,00	36,51	0,00	-	
23	10,00	35,04	0,00	-	
24	10,00	33,96	0,00	-	

Slika 6.1 prikazuje kako se mijenja stanje napunjenosti baterijskog spremnika u ovisnosti o promjeni cijene električne energije. Na dijagramu je vidljivo da se baterija puni u ranim jutarnjim satima odnosno do 7:00, a kasnije porastom cijene električne energije baterija se prazni. Kako buduća cijena nije veća od cijene električne energije u vremenu od 19:00 do 24:00 znači da se baterija u to vrijeme neće puniti te stanje napunjenosti baterijskog spremnika će ostati na minimumu odnosno 10 MWh.



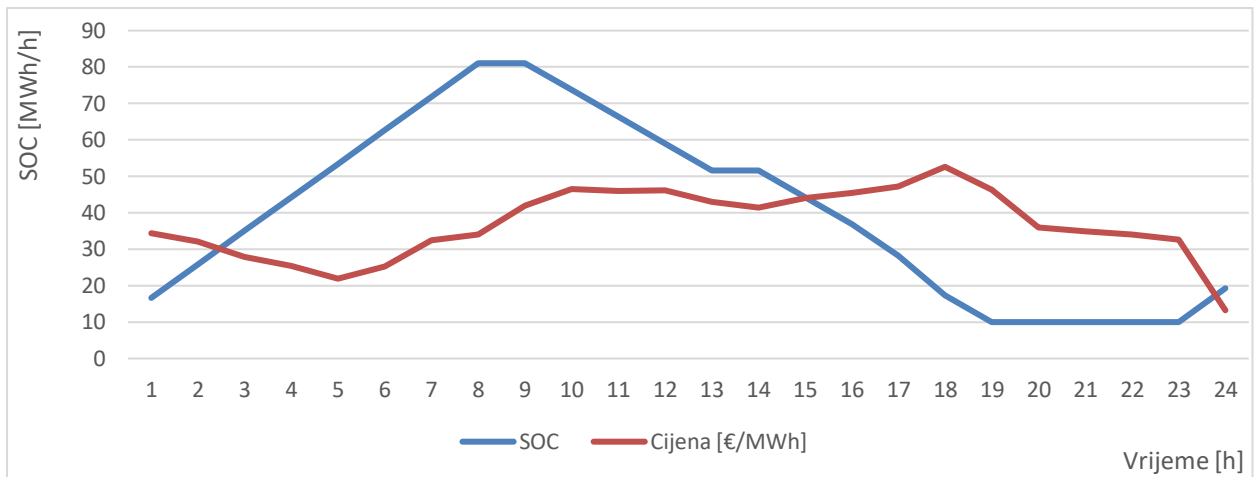
Slika 6.1 Ovisnost stanja napunjenosti baterije o očekivanoj cijeni električne energije za dan 13.12.2019.

Dijagram koji pokazuje satnu ponudu na tržištu dan unaprijed na slici 6.2 odgovara krivulji stanja napunjenosti baterije na slici 6.1. Slika 6.2 prikazuje još i koliko će energije baterija primiti ili predati u mrežu za svaki sat tijekom dana. Kako baterija radi u dva segmenta s različitim efikasnostima punjenja i pražnjenja mogu se razlikovati satne ponude na tržištu tj. u dva različita sata energija punjenja ili pražnjenja ne mora biti jednaka.

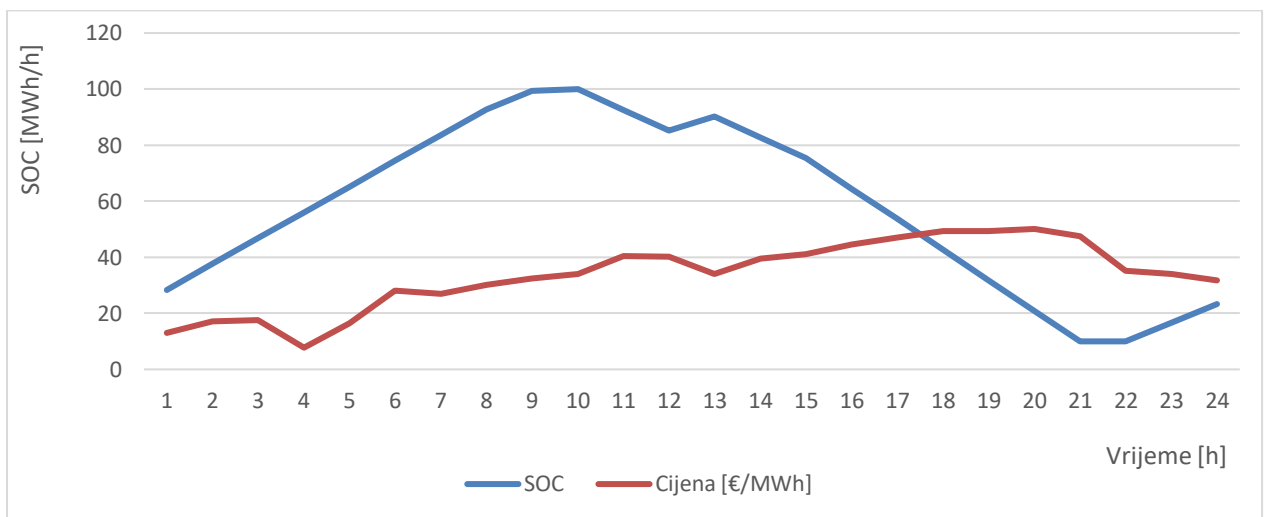


Slika 6.2 Satna ponuda na tržištu dan unaprijed za dan 13.12.2019.

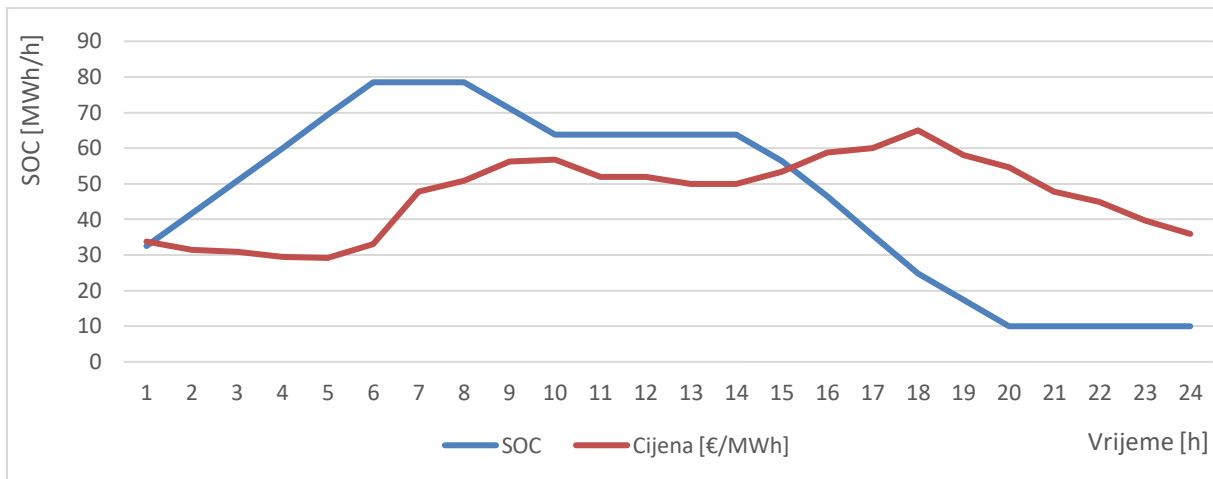
Na slikama od 6.3 do 6.5 prikazana je promjena stanja napunjenosti baterije o ovisnosti o promjeni cijene električne energije tijekom dana. Kao i za prethodno opisan dan, baterija se puni u jutarnjim satima kad je cijena električne energije niža, a baterija se prazni odnosno prodaje se električna energija s porastom cijene tijekom dana.



Slika 6.3 Ovisnost stanja napunjenosti baterije o očekivanoj cijeni električne energije za dan 14.12.2019.

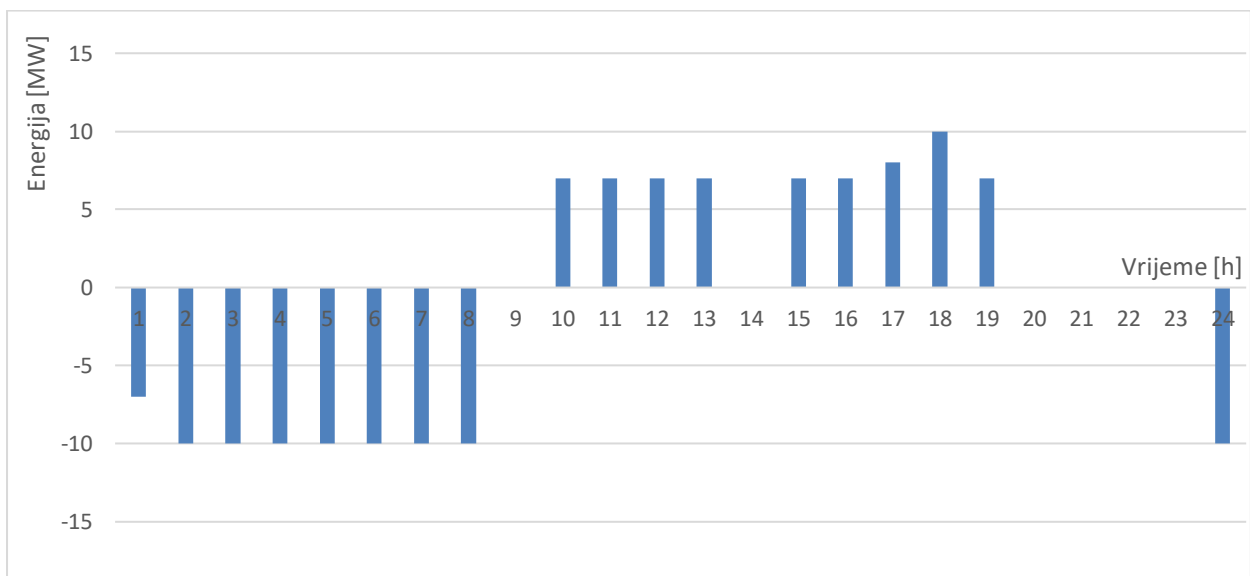


Slika 6.4 Ovisnost stanja napunjenosti baterije o očekivanoj cijeni električne energije za dan 15.12.2019.

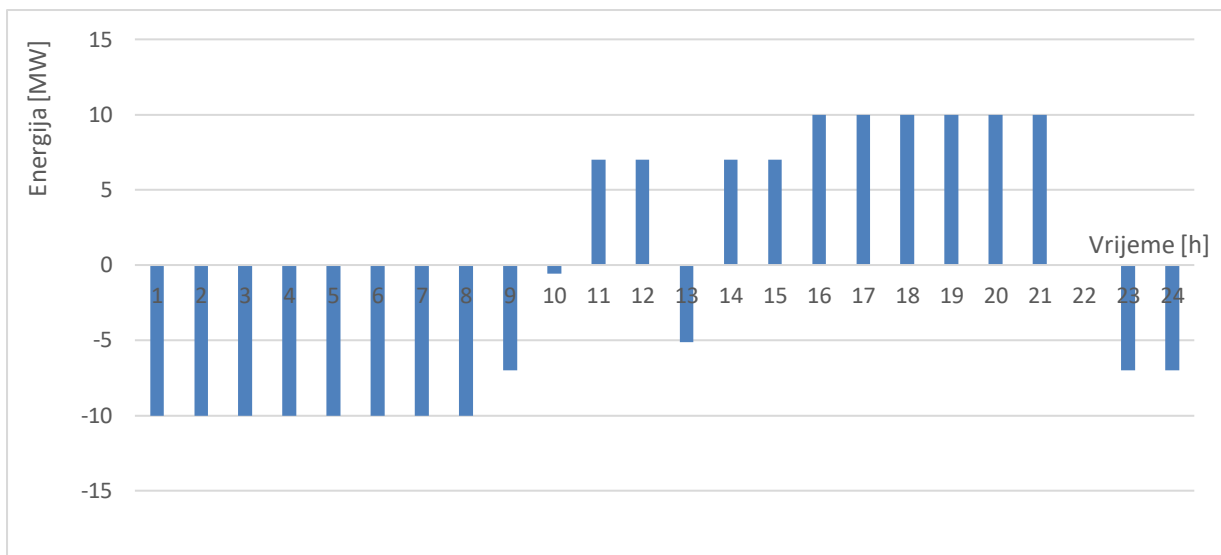


Slika 6.5 Ovisnost stanja napunjenosti baterije o očekivanoj cijeni električne energije za dan 16.12.2019.

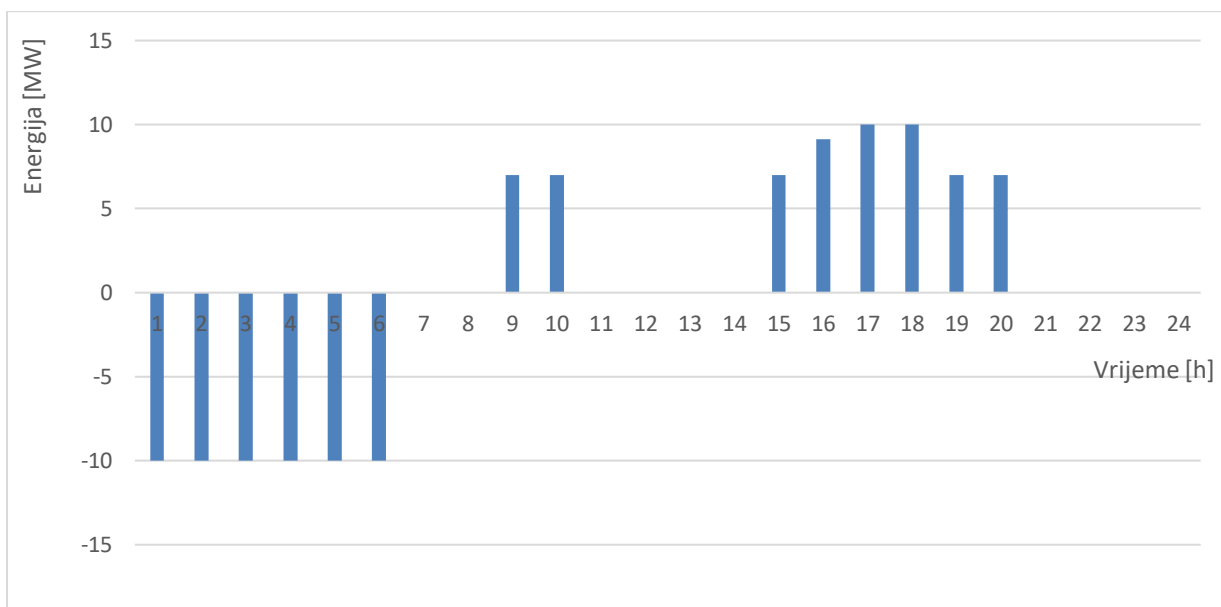
Slike 6.6, 6.7 i 6.8 prikazuju satnu ponudu na dan unaprijed tržištu za preostale dane simulacije. Isto kao i za dan 13. prosinca, krivulja stanja napunjenosti baterijskog spremnika odgovara dijagramima satnih ponuda. Negativna satna ponuda označava punjenje baterije, a pozitivna pražnjenje baterije. Iz slika se može zaključiti da se baterija puni u jutarnjim satima, a prazni poslijepodnevni i večernjim satima. 14. i 15. prosinca baterija se puni u kasnim večernjim satima, a to ovisi o budućoj cijeni električne energije te će to biti detaljnije opisano u poglavlju 6.3.



Slika 6.6 Satna ponuda na tržištu dan unaprijed za dan 14.12.2019.



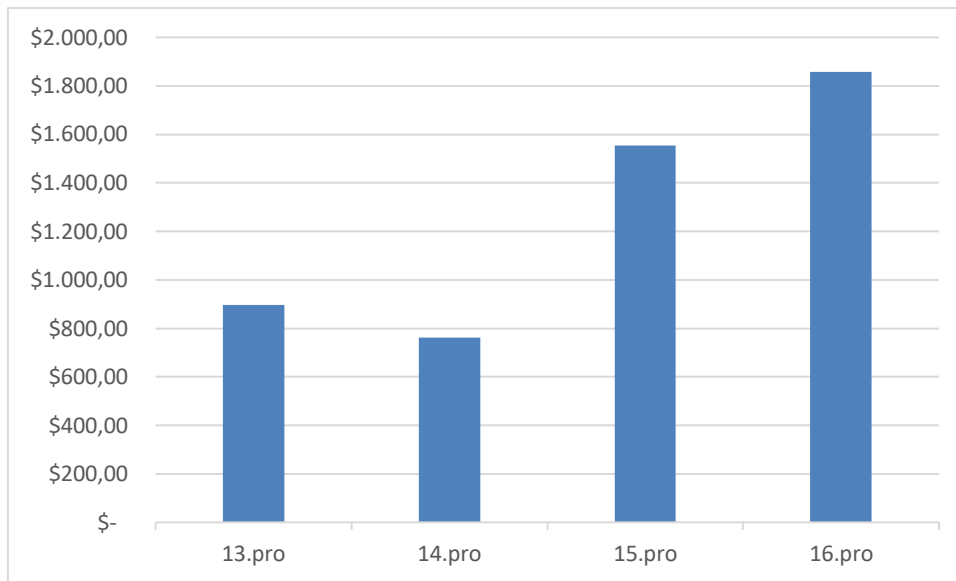
Slika 6.7 Satna ponuda na tržištu dan unaprijed za dan 15.12.2019.



Slika 6.8 Satna ponuda na tržištu dan unaprijed za dan 16.12.2019.

Kako se cijena električne energije formirana na osnovu dostavljenih naloga za prodaju i kupnju za svaki sat, tako da se cijena za svaki dan može dosta razlikovati. Prema tome profit koji je baterija mogla ostvariti u razdoblju od 13. prosinca do 16. prosinaca, može varirati, što je i prikazano na slici 6.9.



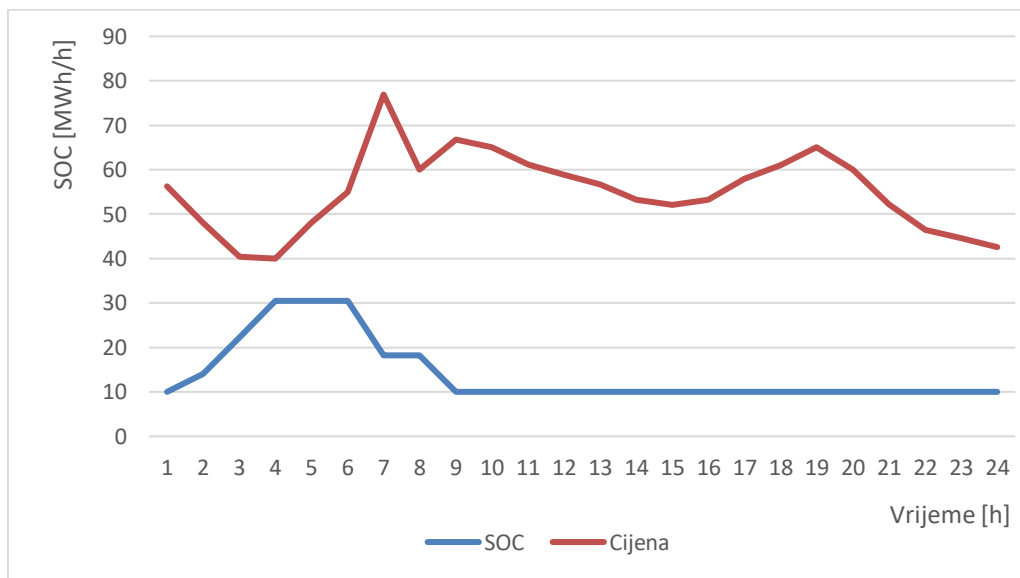


Slika 6.9 Ostvareni profit za sve dane simulacije

## 6.2 SIMULACIJA PROCESA S RAZLIČITIM EFIKASNOSTIMA PUNJENJA I PRAŽNJENJA

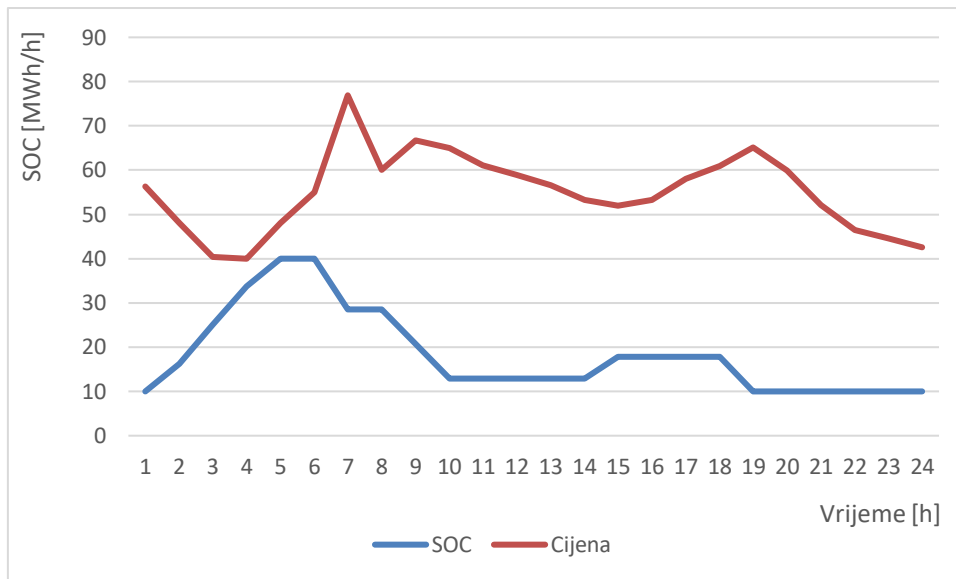
Različite vrste baterija mogu imati različite faktore korisnosti, kao što je već navedeno u tablici 3.2. Prilikom punjenja i pražnjenja dolazi do gubitaka koji mogu znatno utjecati na profit koji baterija može ostvariti prilikom sudjelovanja na tržištu električne energije. U simulaciji će biti opisano kako promjena efikasnosti punjenja odnosno pražnjenja utječe na maksimizaciju zarade. Kako baterija radi u dva segmenta s različitim efikasnostima, prvi segment ima veću efikasnost, a s povećanjem stanja napunjenosti baterije ta efikasnost se smanjuje.

U simulaciji će biti prikazana 3 slučaja s različitim efikasnostima i to  $\eta_1=0,85$   $\eta_2=0,75$ ,  $\eta_1=0,9$   $\eta_2=0,8$  i  $\eta_1=0,95$   $\eta_2=0,85$ . Na slici 6.10 je prikazano kako se promjenom cijene električne energije mijenja stanje napunjenosti baterijskog spremnika. Vidljivo je da se baterija puni samo tijekom tri sata kad je cijena električne energije najniža, a prazni se kroz dva sata kada je cijena najviša. Tijekom ostalih sati nije isplativo punjenje odnosno pražnjenje baterije pa za te sate nema nikakvih podataka.



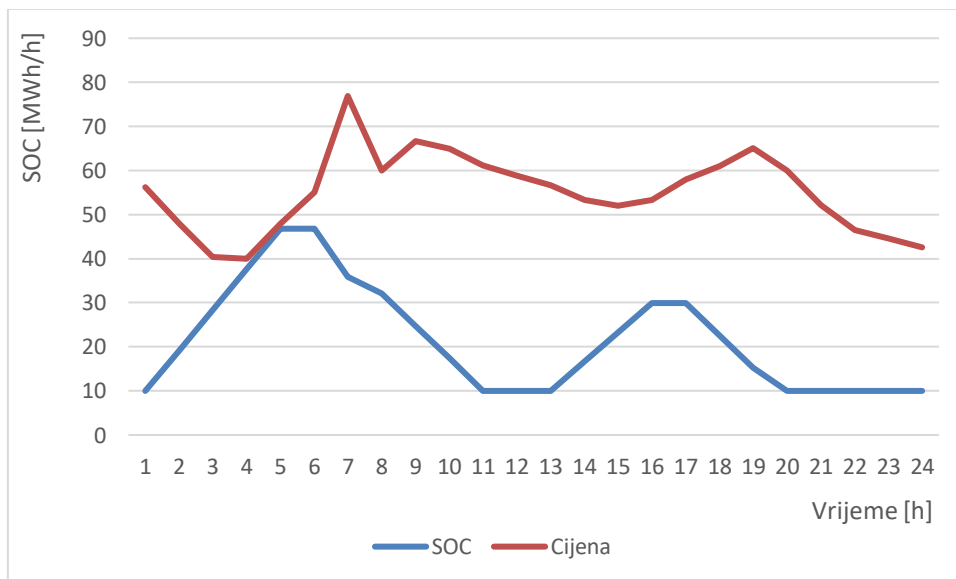
Slika 6.10 Ovisnost stanja napunjenosti baterije o očekivanoj cijeni električne energije za  $\eta_1=0,85$   $\eta_2=0,75$

Povećanjem efikasnosti punjenja i pražnjenja povećava se stanje napunjenosti baterije i ostvaruje se veći profit. Tako da prema slici 6.11 baterija se puni tijekom pet sati, a prazni se tijekom četiri sata s najvećom cijenom.



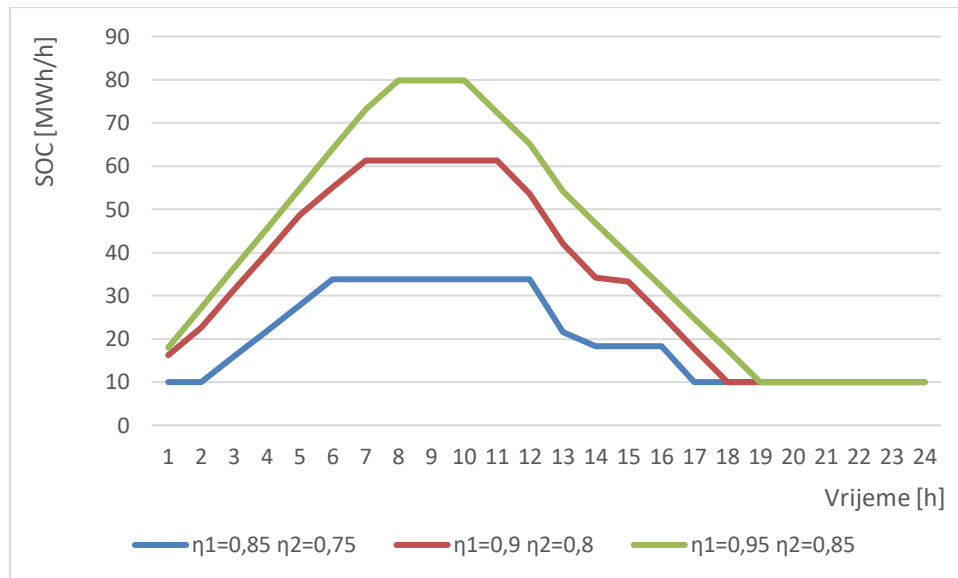
Slika 6.11 Ovisnost stanja napunjenosti baterije o očekivanoj cijeni električne energije za  $\eta_1=0,9$   $\eta_2=0,8$

Slučaj kad su efikasnosti pojedinih segmenata  $\eta_1=0,95$   $\eta_2=0,85$  koristili smo i u drugim simulacijama jer tada ostvarujemo najveći profit. Na slici 6.12 se vidi da se baterija puni tijekom sedam sati, a prazni se tijekom osam sati.



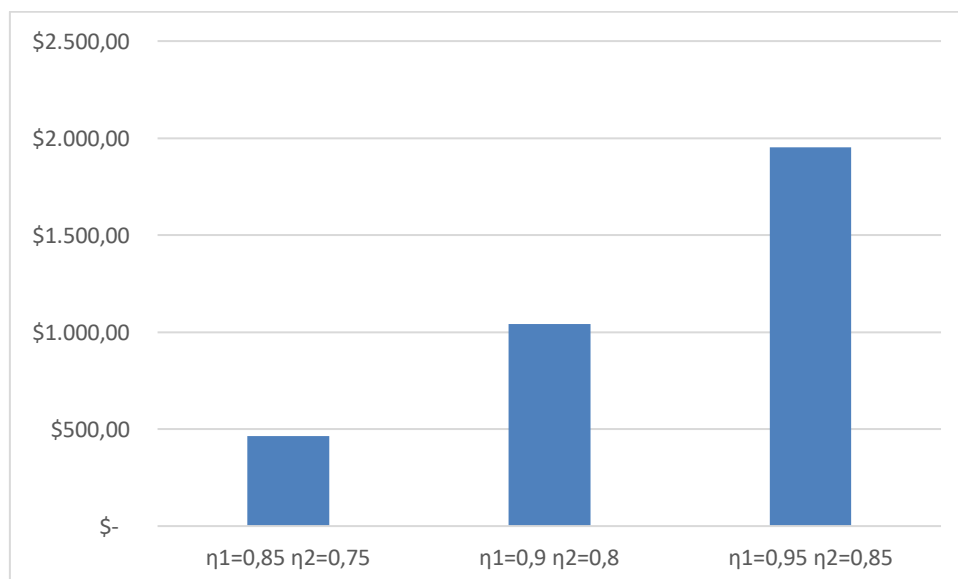
Slika 6.12 Ovisnost stanja napunjenosti baterije o očekivanoj cijeni električne energije za  $\eta_1=0,95$   $\eta_2=0,85$

Usporedba stanja napunjenosti baterije za sva tri slučaja prikazana je na jednom dijagramu na slici 6.13. Na slici je jasno prikazano kako se povećanjem efikasnosti povećava i stanje napunjenosti baterije, a samim time ostvaruje se i veća dobit. Stoga treba težiti da baterije imaju što veću efikasnost punjenja i pražnjenja jer je to jedan od najvažnijih faktora.



Slika 6.13 Usporedba stanja napunjenosti baterije s različitim efikasnostima

Na slici 6.14 prikazana je dobit tijekom dana za tri slučaja efikasnosti punjenja i pražnjenja. Povećanjem efikasnosti za 5%, u oba segmenta, ostvaruje se približno dvostruko veći profit.



Slika 6.14 Profit ostvaren s različitim efikasnostima

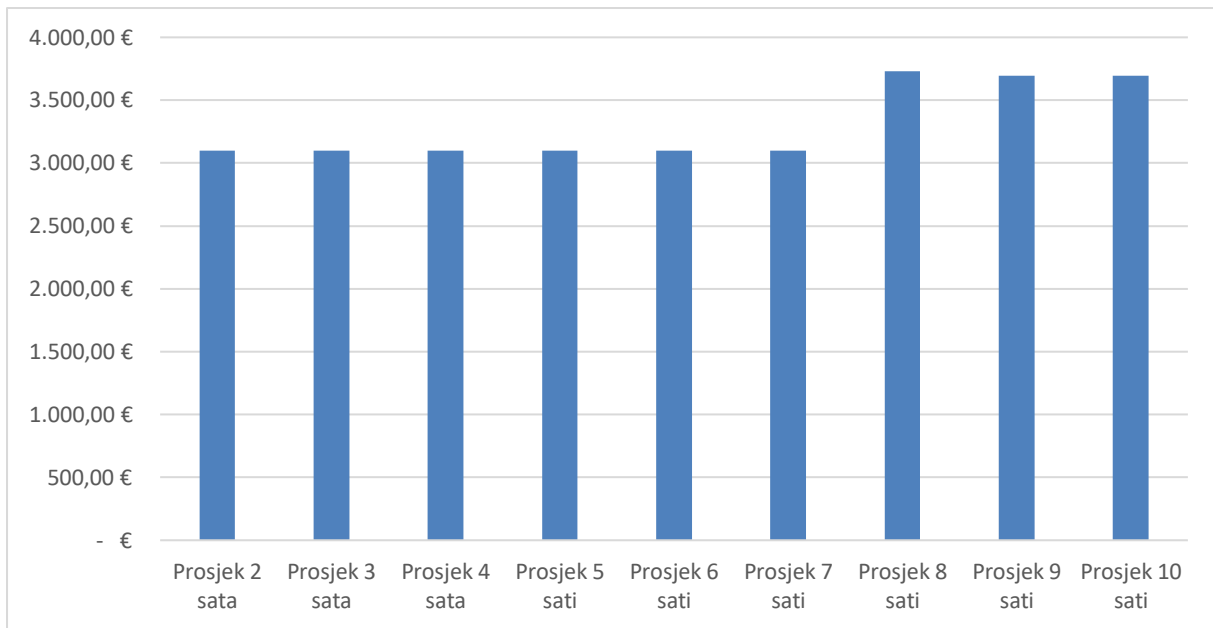
### 6.3 SIMULACIJA PROCESA S RAZLIČITOM BUDUĆOM CIJENOM

Buduća cijena označava cijenu električne energije na dan unaprijed tržištu koja će biti idući dan. Buduća cijena je bitna jer ako je cijena električne energije promatranog dana niža od cijene koja će biti idućeg dana, tad se baterija treba puniti tijekom promatranog dana, a prazniti idući dan kada cijena naraste. Ova situacija je izraženija kod kasnih večernjih sati, kada cijena električne energije može biti nešto niža i kod ranih jutarnjih sati idućeg dana kad cijena može porasti. Uvođenjem buduće cijene u simulaciju dobili smo mogućnost povezivanja dva dana te ostvarivanja većeg profita.

U ovoj simulaciji promatrano je dva dana gdje se buduća cijena mijenja te je prikazano kada se ostvaruje najveći profit. Buduću cijena je promatrana u devet slučajeva u ovoj simulaciji. U obzir su uzete cijene električne energije za 10 sati idućeg dana. Pa je tako prvi slučaj prosjek cijena dva sat, drugi slučaj je prosjek cijena tri sata i tako sve kada je deveti slučaj prosjek cijena deset sati. U tablici 6.2 su prikazani prosjeci svih navedenih sati. Na slici 6.15 je prikazana dobit za svaki slučaj simulacije. Vidljivo je da za prosjek osam sati ostvaruje se najveća dobit iako prema tablici 6.2 buduća cijena tada nije najveća. Buduća cijena treba biti optimalna veličina. Odnosno ako postavimo preveliku cijenu za buduću tada će se baterija puni u razdoblju kada je cijena električne energije niža od buduće cijene te nakon što se baterija napuni do svog maksimuma, baterija se neće prazniti sve dok cijena električne energije ne bude veća od buduće cijene.

Tablica 6.2 Buduće cijene električne energije

Prosjek	Buduća cijena
Prosjek 2 sata	\$ 37,93
Prosjek 3 sata	\$ 36,95
Prosjek 4 sata	\$ 36,39
Prosjek 5 sati	\$ 36,11
Prosjek 6 sati	\$ 36,74
Prosjek 7 sati	\$ 40,85
Prosjek 8 sati	\$ 44,52
Prosjek 9 sati	\$ 49,63
Prosjek 10 sati	\$ 53,68

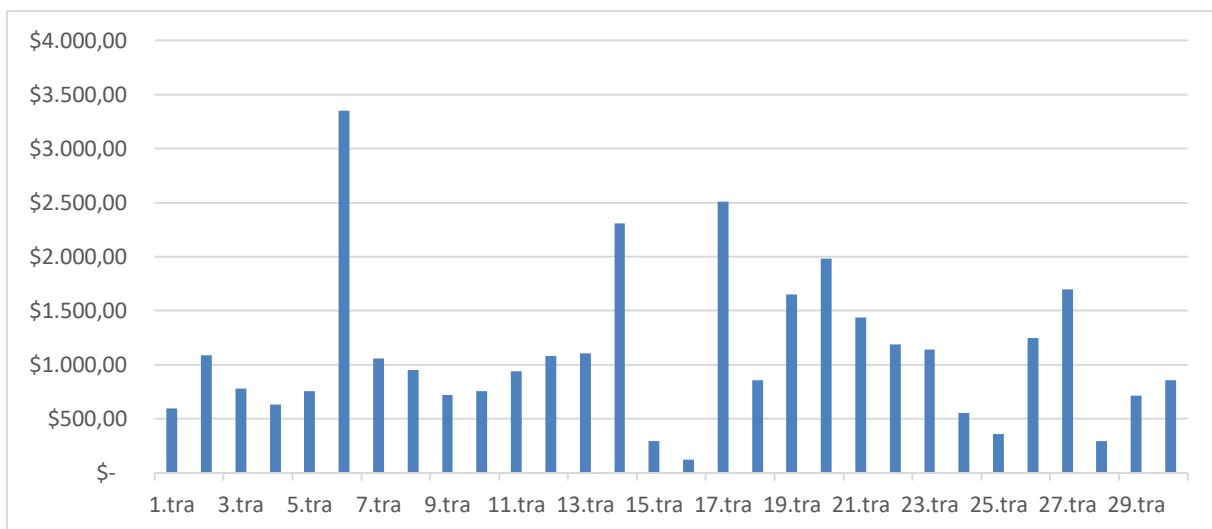


Slika 6.15 Profit ostvaren pri različitim budućim cijenama

## 6.4 SIMULACIJA PROCESA TIJEKOM JEDNOG MJESECA

Za dobivanje najpreciznijih rezultata potrebno je izvršiti mjerenje u dužem vremenskom intervalu. Tako da je u ovoj simulaciji period promatranja jedan mjesec, travanj 2020. Parametri simulacije su identične onima opisanim u poglavlju 6.1, osim cijena električne energije, gdje je period promatranja bio četiri dana. U ovome poglavlju biti će samo prikazan profit koji baterija ostvaruje na tržištu, za svaki dan posebno te ukupan profit tijekom cijelog mjeseca.

Kako se cijena mijenja svakog sata i svakog dana tako su i prihodi različiti za svaki dan kao što je vidljivo na slici 6.16. Zarada za svaki dan će ovisiti isključivo o cijeni električne energije, bilo to buduća cijena ili cijena za pojedini sat. Sa slike još možemo zaključiti da velikom profitu, kao što je 6. travnja i 17. travnja, prethodi dan s manjim profitom. Takva situacija nastaje zbog buduće cijene koja je veća nego cijena električne energije prethodnog dana. Tijekom travnja 2020. ostvaren je profit od 33.049,45 dolara.



Slika 6.16 Zarada tijekom mjeseca

## 7. ZAKLJUČAK

Cijena električne energije najviše ovisi o potrebama potrošača. Tijekom noći cijena može biti puno manja nego tijekom dana kad je veća potreba za električnom energijom. Upravo ta razlika u cijeni se može iskoristiti uz uvjet skladištenja energije. Baterijski spremnik omogućava skladištenje električne energije te na taj način može donijeti veliki profit.

Maksimizacija zarade predstavlja glavni faktor u diplomskom radu stoga je potrebno napraviti optimalni plan angažiranja baterijskog spremnika. Cijena električne energije znatno određuje koliku zaradu baterija može ostvariti na dan unaprijed tržištu. Sve cijene su promatrane na CROPEX-ovoj službenoj stranici.

Krivulja punjenja i pražnjenja nije linearna već je podijeljena na dva segmenta koji su linearizirani. Prvi segment ima veći stupanj korisnosti, a s povećanjem stanja napunjenosti baterijskog spremnika efikasnost punjenja se smanjuje pa drugi segment ima manji stupanj korisnosti. Krivulja pražnjenja je identična krivulji punjenja.

Optimizacijski model je opisan funkcijom cilja, ograničenjima i limitima varijabli. Funkcija cilja se odnosi na maksimizaciju zarade, ograničenja na balans energije, a limiti varijabli na maksimalnu snagu punjenja odnosno pražnjenja. Također je dan matematički zapis optimizacijskog modela u poglavlju 5.2.

Simulacije optimizacijskog modela su podijeljene na četiri slučaja. Simulacija procesa tijekom četiri dana, simulacija s različitim efikasnostima punjenja i pražnjenja, simulacija s različitom budućom cijenom i simulacija tijekom jednog mjeseca. U simulaciji tijekom četiri dana prikazano je kako se mijenja stanje napunjenosti baterijskog spremnika s promjenom cijene električne energije. Baterija se puni u razdoblju kada je cijena najniža te se prazni u periodu kada je cijena najveća. U obzir treba uzeti i druge parametre kao što je efikasnost punjenja i pražnjenja. Iz simulacija se može zaključiti da se povećanjem efikasnosti od 5% dobiva približno dvostruko veći profit. Buduća cijena označava cijenu električne energije koja će biti dan poslije promatranog dana. Kako se cijena mijenja iz sata u sat, a buduća cijena je jedna, uzeti su prosjeci prvih deset sati tijekom dana. Simulacija prikazuje kako pri prosjeku prvih osam sati dana se dobije najveća zarada pa je taj prosjek uzet za sve simulacije. Konačno zadnja simulacija tijekom mjesec dana obuhvaća sve prethodne simulacije i prikazuje koliki se profit ostvari tog mjeseca.



## SAŽETAK

U radu je opisano davanje ponuda umreženih baterijskih spremnika na dan unaprijed tržištu električne energije. Optimizacijski model baterijskog spremnika je napravljen s ciljem maksimizacije zarade prema cijenama električne energije na CROPEX-ovim službenim stranicama. Teorijski dio opisuje općenito baterijske spremnike te je naveden jedan primjer i još je opisano tržište električne energije. Nadalje je opisan optimizacijski model, dan je matematički zapis tog modela i napravljene su simulacije.

Optimizacijski model je napravljen u programskom paketu MATLAB te su izvršene četiri simulacije s različitim parametrima. Na osnovu rezultata simulacije se može zaključiti da stanje napunjenosti baterije je obrnuto proporcionalno cijeni električne energije. Povećanjem efikasnosti baterije povećava se i zarada koju baterija ostvaruje sudjelovanjem na tržištu. O budućoj cijeni će ovisiti hoće li baterija pohraniti određenu količinu energije prethodni dan ili ne. Ako je buduća cijena veća od cijena električne energije prethodnog dana onda će se pohraniti određena količina energije u suprotnom pohrana energija će ostati na minimumu.

Ključne riječi: baterijski spremnik, električna energije, tržište električne energije, simulacije, profit, stanje napunjenosti baterije

## **ABSTRACT**

The paper describes the bidding of battery containers on day ahead electricity market. The optimization model of the battery was made to maximize profit according to the electricity prices on CROPEX official website. The theoretical part describes battery containers in general and one example of battery storage is given, and the electricity market is also described. The optimization model is further described, a mathematical notation of that model is given, and simulations were made.

The optimization model was made in the MATLAB software package and four simulations with different parameters were made. Based on the simulation results, it can be concluded that the state of charge of the battery is inversely proportional to the price of electricity. Increasing the efficiency of the battery also increases the earnings that the battery makes by participating in the market. The future price will depend on whether the battery stores a certain amount of energy the day before or not. If the future price is higher than the electricity price of the previous day then a certain amount of energy will be stored otherwise energy storage will remain at a minimum.

Keywords: battery container, electricity, electricity market, simulations, profit, state of charge of the battery

## **ŽIVOTOPIS**

Mislav Ružić je rođen 1. siječnja 1996. u Slavonskom Brodu. Pohađao je Osnovnu školu Vjekoslav Klaić u Garčinu. Nakon toga upisuje Tehničku Školu Slavonski Brod, smjer elektrotehničar. 2014. godine upisuje preddiplomski studij na Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, smjer elektrotehnika. 2017. godine stječe titulu prvostupnika elektrotehnike i nakon toga upisuje diplomski studij na istom fakultetu, izborni blok elektroenergetski sustavi.

Mislav Ružić

## LITERATURA

- [1] Hrvoje Pandžić, Vedran Bobanac, An Accurate Charging Model of Battery Energy Storage, IEEE Transactions on Power Systems (2018), Early Access
- [2] I. Đurić, T. Marijanić, J. Škare, Baterijski spremnici električne energije u distribucijskoj mreži, Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije, [https://www.ho-cired.hr/images/OPATIJA2018/Referati\\_po\\_studijskim\\_odborima/SO5/SO5-17.pdf](https://www.ho-cired.hr/images/OPATIJA2018/Referati_po_studijskim_odborima/SO5/SO5-17.pdf) (1.5.2019.)
- [3] DOE Global Energy Storage Database, Office of Electricity, <https://energystorageexchange.org> (5.6.2019.)
- [4] Tesla, Masive energy storage Megapack [https://www.tesla.com/en\\_EU/megapack](https://www.tesla.com/en_EU/megapack) (28.5.2020.)
- [5] Electrek, Tesla powerpack projects <https://electrek.co/guides/tesla-powerpack/> (28.5.2020.)
- [6] Hornsdale power reserve, Neoen <https://hornsdalepowerreserve.com.au/> (4.6.2020.)
- [7] RenewEconomy Australia, Clean energy news and analysis <https://reneweconomy.com.au/> (4.6.2020.)
- [8] HROTE, Hrvatski operator tržišta energije <https://www.hrote.hr> (5.6.2019.)
- [9] CROPEX, Croatian power exchange, <https://www.cropex.hr/hr/> (29.4.2019.)