

# Optimalno korištenje stacionarnog spremnika energije u sustavu s fotonaponskom elektranom i električnim vozilom

---

Radić, Nikša

Master's thesis / Diplomski rad

2021

*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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:743771>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-29**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni studij**

**OPTIMALNO KORIŠTENJE STACIONARNOG  
SPREMNIKA ENERGIJE U SUSTAVU S  
FOTONAPONSKOM ELEKTRANOM I ELEKTRIČNIM  
VOZILOM**

**Diplomski rad**

**Nikša Radić**

**Osijek, 2021.**

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
1.1. Zadatak diplomskog rada .....	1
2. PREGLED LITERATURE U PODRUČJU ISTRAŽIVANJA FOTONAPONSKE ELEKTRANE I STACIONARNOG SPREMNIKA BATERIJE .....	2
3. FOTONAPONSKA ELEKTRANA.....	3
3.1. Uvod u fotonaponsku elektranu .....	3
3.2. Fotonaponski paneli i njihova podjela.....	3
3.3. Fotonaponski sustavi.....	6
3.3.1. Samostalni fotonaponski sustavi.....	8
3.3.2 Mrežni fotonaponski sustavi .....	9
4. POHRANA ELEKTRIČNE ENERGIJE.....	11
4.1. Baterije .....	11
4.1.1. Punjenje i pražnjenje baterije .....	13
5. ELEKTRIČNI AUTOMOBILI .....	17
5.1. Punjenje električnih automobila i njihove vrste priključaka .....	17
6. MATEMATIČKI OPIS MODELA.....	24
6.1. Funkcija cilja za minimizaciju ukupnih troškova.....	24
7. REZULTATI SIMULACIJE .....	30
7.1. Priprema ulaznih podataka .....	30
7.2. Scenarij 1 – dan u 6. mjesecu .....	39
7.3. Scenarij 1 – dan u 1. mjesecu .....	42
7.4. Scenarij 2 – dan u 6. mjesecu .....	44
7.5. Scenarij 2 – dan u 1. mjesecu .....	47
7.6. Scenarij 3 – dan u 6. mjesecu .....	49
7.7. Scenarij 3 – dan u 1. mjesecu .....	52
ZAKLJUČAK.....	54
SAŽETAK.....	55
ABSTRACT .....	56
LITERATURA.....	57
ŽIVOTOPIS.....	60

# 1. UVOD

Potražnja električne energije iz dana u dan je sve veća. Osim dosadašnjih pasivnih kupaca javljaju se aktivni kupci (potrošači s vlastitom proizvodnjom) električne energije. Za povećanje dobiti, aktivni kupac s proizvedenom električnom energijom raspolaže prema svojim potrebama odnosno prema tržišnim uvjetima. U ovom radu aktivni potrošač raspolaže s fotonaponskom elektranom, električnim vozilom i sa stacionarnim spremnikom električne energije. Razrađena su tri optimizacijska modela s različitim kombinacijama snaga punjenja i pražnjenja stacionarnog spremnika i baterijskog spremnika električnog automobila. Diplomski rad se sastoji od sedam poglavlja. Drugo poglavlje daje pregled literature koja je korištena pri istraživanju fotonaponske elektrane, električnog i stacionarnog baterijskog spremnika. Treće poglavlje sadrži temeljnu teorijsku podlogu o fotonaponskim elektranama. U četvrtom poglavlju je opisan princip rada baterije te pohrana električne energije u baterijama dok peto poglavlje sadrži osnove o električnim automobilima i vrste njihovih priključaka. U šestom poglavlju dan je opis matematičkog modela za optimalno korištenje stacionarnog baterijskog spremnika i baterijskog spremnika električnog vozila, dok u sedmom poglavlju je navedeni model primijenjen na aktivnog kupca u cilju minimizacije troškova kućanstva.

## 1.1. Zadatak diplomskog rada

U diplomskom radu potrebno je objasniti načine modeliranja stacionarnog spremnika za potrebe izrade optimizacijskih modela. Nadalje, potrebno je izraditi optimizacijski model sustava kućanstva koje posjeduje fotonaponsku elektranu, stacionarni spremnik te električno vozilo s ciljem minimizacije ukupnih troškova za potrošenu električnu energiju.

## **2. PREGLED LITERATURE U PODRUČJU ISTRAŽIVANJA FOTONAPONSKE ELEKTRANE I STACIONARNOG SPREMNIKA BATERIJE**

U literaturi [1] su opisani monokristalni, polikristalni i ostale vrste silicijskih panela. Autor Ljubomir Majdandžić, predstavio je u literaturi [4] fotonaponske sustave te njihove podjele u ovisnosti o načinu rada. U tim podjelama fotonaponskih sustava, postoji samostalni fotonaponski sustav koji kao što sam naziv govori, sustav koji nije priključen na mrežu te koji su spojeni na spremnik energije. Iz literature [6] su izvučene informacije o podjeli sustava za pohranu električne energije te iz literatur [7] i [8] o baterijama i njihovim osnovama. Baterije koje su korištene za skladištenje energije, vrlo je važno poznavati njihovo punjenje i pražnjenje, odnosno njihov životni vijek (eng. *State of health* – SOH) i razina napunjenosti (eng. *State of charge* – SOC), te uz pomoć literature [10] je to objašnjeno zajedno uz njihove metode procjena koje se koriste. U diplomskom radu kućanstvo sadrži električni automobil također sadrži svoj baterijski spremnik te u literaturi [14] je opisana podjela električnih automobila te njihove vrste priključaka koje se koriste za punjenje. Prema literaturi [24] globalne emisije CO<sub>2</sub> su se u prometu povećale za manje od 0,5 % u 2019. godini zbog povećanja učinkovitosti i korištenja biogoriva. Usprkos tome, današnji prijevoz i dalje doprinosi 24 % izravnim emisijama CO<sub>2</sub>. Kako bi došlo do smanjenja stakleničkih plinova na 0 % do 2050., potaknuta su ulaganja u obnovljive izvore energije i u kupnje električnih automobila. Također su pokrenuti i projekti, kako bi se pronašlo optimalno rješenje za rad elektroenergetske mreže. Hrvatska kao članica EU-a donosi pravilnik u 2015. zvan „nZEB“. U njemu se navodi da se iz obnovljivih sustava mora dobiti minimalni udio 20 % iskorištene energije prema literaturi [25]. U literaturi [26] je predloženo planiranje intervala punjenja i pražnjenja električnih vozila na zajedničkom parkiralištu stanara. Upravljanje postupkom punjenja i pražnjenja baterije električnog vozila koje su spojene na kućnu instalaciju i u kombinaciji sa fotonaponskom elektranom prema literaturi [27]. Iz literature [28] su izvučeni rezultati koji pokazuju da bi se pohranjena električna energija iz fotonaponske elektrane mogla koristiti za punjenje električnih automobila u kasnijim satima.

### **3. FOTONAPONSKA ELEKTRANA**

#### **3.1. Uvod u fotonaponsku elektranu**

Jedna od iznimno važnih obnovljivih izvora energije su fotonaponske elektrane koji koriste Sunčevo zračenje kao izvor za pretvorbu u električnu energiju. Uz pomoć fotonaponskih panela se izvodi postupak pretvorbe energije u istosmjernu energiju. Putem izmjenjivača se istosmjerna energija pretvara i predaje u elektroenergetski sustav. U fizici je ovakva vrsta pretvorbe energije još poznata kao fotonaponski efekt.

#### **3.2. Fotonaponski paneli i njihova podjela**

Fotonaponski paneli u stvarnom svijetu mogli bi postići učinkovitost od oko 15 posto, a od toga vjerojatno neće puno odstupati. Sve vrste dosadašnjih faktora u stvarnom svijetu utjecat će na nazivnu učinkovitost, uključujući konstrukciju panela, njihov položaj i nagib, jesu li ikada u sjeni, koliko ih čistite, koliko im je vruće (povećane temperature imaju tendenciju smanjenja njihove učinkovitosti), te jesu li ventilirani (dopuštajući cirkulaciju zraka ispod) kako bi se ohladili.

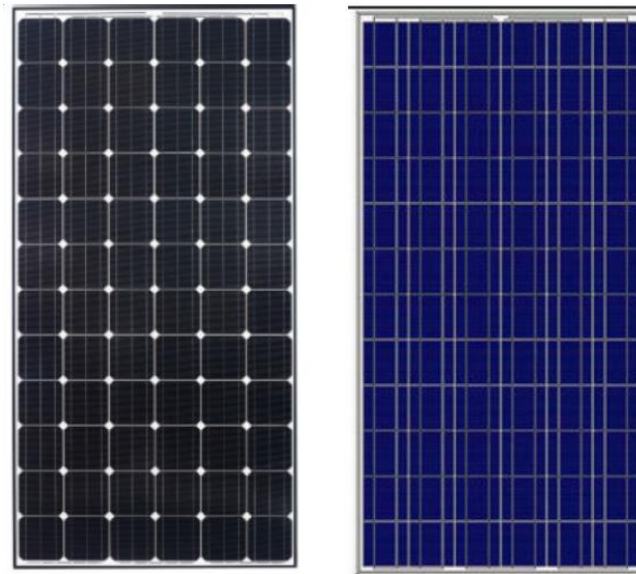
Fotonaponski paneli se mogu podijeliti na panele organskog i neorganskog podrijetla. Panele neorganskog podrijetla dijelimo na one bazirane na siliciju te na one bazirane na ostalim materijalima. U današnje vrijeme najzastupljeniji su kristalni silicijski fotonaponski paneli.

Silicijski paneli mogu biti podijeljeni na:

- a) „ Monokristalne Si ćelije - ovaj tip ćelije može pretvoriti 1000 W/m<sup>2</sup> sunčevog zračenja u 140 W električne energije površinom ćelija od 1 m<sup>2</sup>. Za proizvodnju monokristalnih Si ćelija potreban je apsolutno čisti poluvodički materijal. Monokristalni štapići se proizvode iz rastvora silicijuma i režu na tanke pločice. Ovakav način izrade omogućuje relativno visoki stepen efikasnosti.

- b)** Polikristalne Si ćelije - ovaj tip ploče može pretvoriti 1000 W/m<sup>2</sup> sunčevog zračenja u 130 W električne energije s površinom ploče od 1 m<sup>2</sup>. Proizvodnja ovih ploča je ekonomski efikasnija u odnosu na monokristalne. Tekući silicij se ulijeva u blokove koji se zatim režu u ploče. Tijekom skrućivanja materijala stvaraju se kristalne strukture različitih veličina, na čijim granicama se pojavljuju greške, pa zbog tog razloga sunčeva fotonaponska ćelija ima manji stupanj iskorištenja.
- c)** Amorfne Si ćelije - ovaj tip ćelije može pretvoriti 1000 W/m<sup>2</sup> sunčevog zračenja u 50 W električne energije s površinom ćelija od 1 m<sup>2</sup>. Ukoliko se tanki film silicijuma stavi na staklo ili neku drugu podlogu to se naziva amorfna ili tankoslojna ćelija. Debljina sloja iznosi manje od 1 μm, stoga su troškovi proizvodnje manji u skladu sa niskom cijenom materijala. Međutim efikasnost amorfni ćelija je niža u usporedbi s drugim tipovima ćelija. Prvenstveno se koristi u opremi gdje je potrebna mala snaga (satovi, kalkulatori) ili kao element fasade
- d)** Galijum arsenidne (GaAs) ćelije - galijum arsenid je poluvodič napravljen iz smjese galijuma i arsena. Pogodan je za upotrebu u višeslojnim i visokoeffikasnim ćelijama. Širina zabranjene trake (band gap) pogodna je za jednoslojne solarne ćelije. Ima visoku apsorpciju, pa je potrebna debljina od samo nekoliko mikrometara da bi apsorbirao sunčeve zrake. Relativno je neosjetljiv na toplotu i zračenje u usporedbi sa Si ćelijama. Zbog visoke cijene koristi se u svemirskim programima i u sistemima s koncentriranim zračenjem gdje je ograničena površina. Projekti koncentriranog zračenja su još u fazi istraživanja. Galijum indijum fosfidna/galijum arsenid (GaInP)/GaAs dvoslojna ćelija ima efikasnost od 30 % i koristi se u komercijalne svrhe za svemirske aplikacije. Ovaj tip ćelije može pretvoriti 1000 W/m<sup>2</sup> sunčevog zračenja u 300 W električne energije sa površinom ćelija od 1 m<sup>2</sup>.
- e)** Kadmij-telur (CdTe) ćelije - ovaj tip ćelije može pretvoriti 1000 W/m<sup>2</sup> sunčevog zračenja u 160 W električne energije površinom ćelija od 1 m<sup>2</sup> u laboratorijskim uvjetima. Kadmij telurid je spoj metala kadmija i polumetala telurija. Pogodan za upotrebu u tankim fotonaponskim panelima zbog fizičkih svojstava i jeftine tehnologije izrade. Usprkos navedenim prednostima zbog kadmijeve otrovnosti i sumnje na kancerogenost nije u širokoj upotrebi.“ [1]

Iz razloga niske cijene na tržištu, danas su monokristalni i polikristalni paneli najviše dostupni. Od navedenih panela, monokristalni paneli imaju veću učinkovitost naspram polikristalne te se smatra da će kroz vrijeme porasti instaliranost fotonaponskih elektrane bazirane na monokristalnim panelima. Primjer monokristalnih i polikristalnih panela su prikazani na slici 3.2.

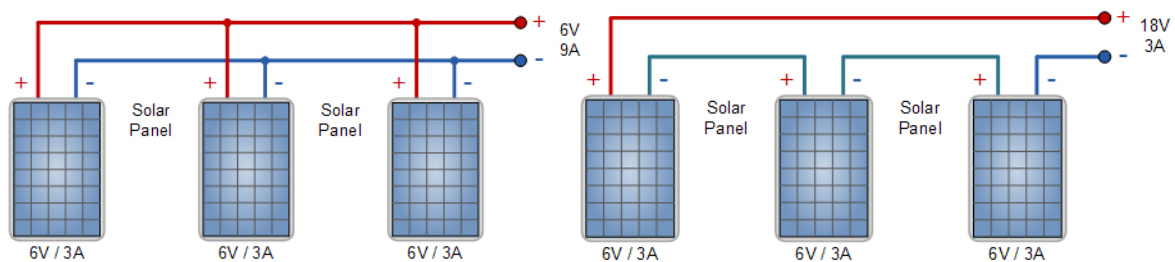


**Slika 3.2.** Detaljan prikaz monokristalnih (lijevo) i polikristalnih (desno) fotonaponskih panela [2]



### 3.3. Fotonaponski sustavi

Fotonaponski sustav je sustav koji pretvara energiju Sunca u električnu energiju. Pod fotonaponskim sustavom se smatra skup opreme kao što su fotonaponski paneli, DC/AC izmjenjivač, baterijski sustav i ostalih dijelova koje čine fotonaponsku instalaciju. Mogu se razlikovati po veličini, od krovnih veličina ili prijenosnih sustava pa sve do većih proizvodnih pogona. Fotonaponski sustav ima zadaću osigurati rad istosmjernim (DC) i izmjeničnim (AC) trošilima bez ili sa drugim izvorom električne energije. Kako bi se postigla određena snaga fotonaponskog sustava, zahtjeva se spajanje više fotonaponskih panela na način serijskog spajanja ili paralelnog spajanja. Na način serijskog spajanja, suma napona pozitivnog i negativnog pola daje zbroj napona pojedinih panela. Na način paralelnog spajanja, suma svih napona je jednak naponu pojedinog panela, a suma svih struja jednaka je sumi pojedinih panela. Primjeri serijskog i paralelnog spoja fotonaponskih panela su prikazani na slici 3.3. [3]

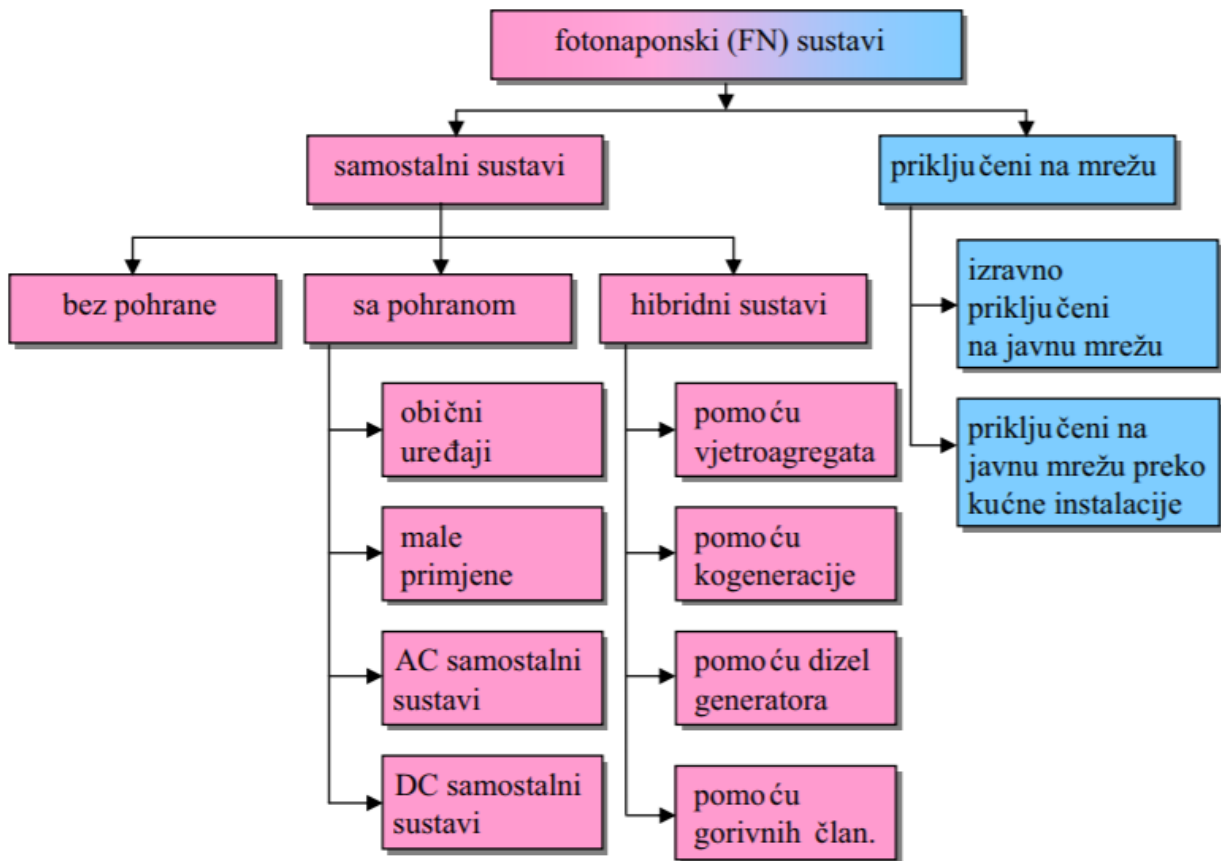


**Slika 3.3.** Primjeri serijskog i paralelnog spoja fotonaponskih panela [3]

Ovisno o načinu rada, fotonaponski sustavi se mogu podijeliti u dvije grupe:

1. Samostalni (izolirani) fotonaponski sustavi (eng. *off-grid*)
2. Mrežni fotonaponski sustavi (eng. *on-grid*) :
  - a) Pasivni mrežni fotonaponski sustavi – sustav kod kojih mrežu koriste kao dodatan izvor
  - b) Aktivni mrežni fotonaponski sustavi - sustav gdje se višak električne energije predaje u mrežu i obrnuto, gdje je potreba električne energije veća od proizvedene

Razlika između mrežnih i samostalnih fotonaponskih sustava je u tome da se proizvedena električna energija kod samostalnih sustava mora se na licu mjesta skladištiti pomoću baterija ili akumulatora, dok u mrežnim sustavima se električna energija predaje elektroenergetskom sustavu. Na slici 3.4. se vidi podjela fotonaponskih sustava.



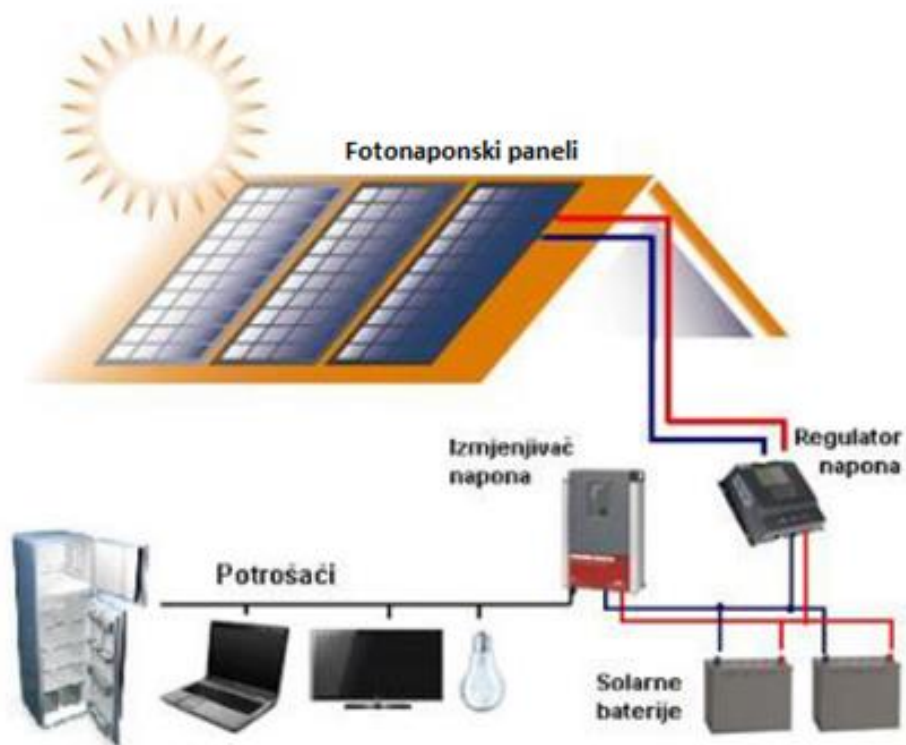
**Slika 3.4.** Podjela fotonaponskih sustava [4]

### 3.3.1. Samostalni fotonaponski sustavi

Samostalni fotonaponski sustavi su sustavi koji nisu spojeni na mrežu. Ovi sustavi su najčešće u uporabi u područjima gdje nema instalirane električne mreže i infrastrukture. Prema slici 3.4. se vidi podjela samostalnih sustava na sustav bez pohrane, sa pohranom i na hibridni sustav. Glavni elementi ovakvog sustava su:

- fotonaponski paneli
- akumulator
- pretvarač
- regulator punjenja
- trošila

Primjer ovakvog sustava nalazi se na slici 3.5.



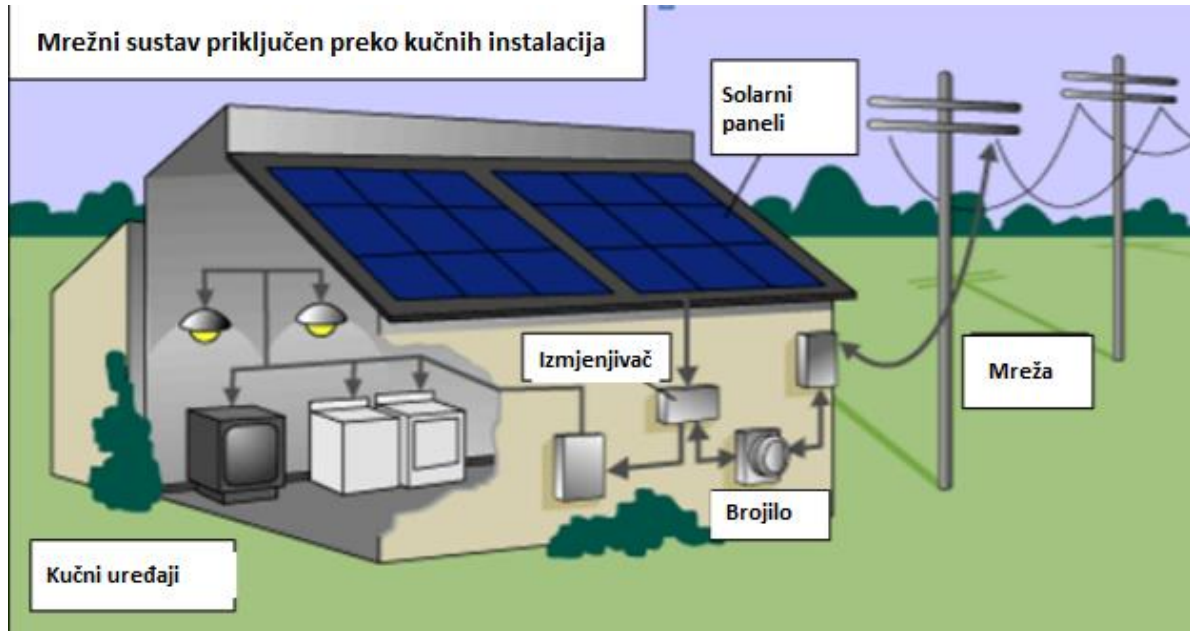
**Slika 3.5.** Samostalni fotonaponski sustav [5]

### 3.3.2 Mrežni fotonaponski sustavi

Mrežni fotonaponski sustav energije je sustav koji je spojen na javnu mrežu. Električna energija koju proizvodi sustav usmjerava se u kućnu mrežu odakle se koristi za pokretanje različitih uređaja. Višak snage u bilo kojem trenutku prenosi se natrag u mrežu.

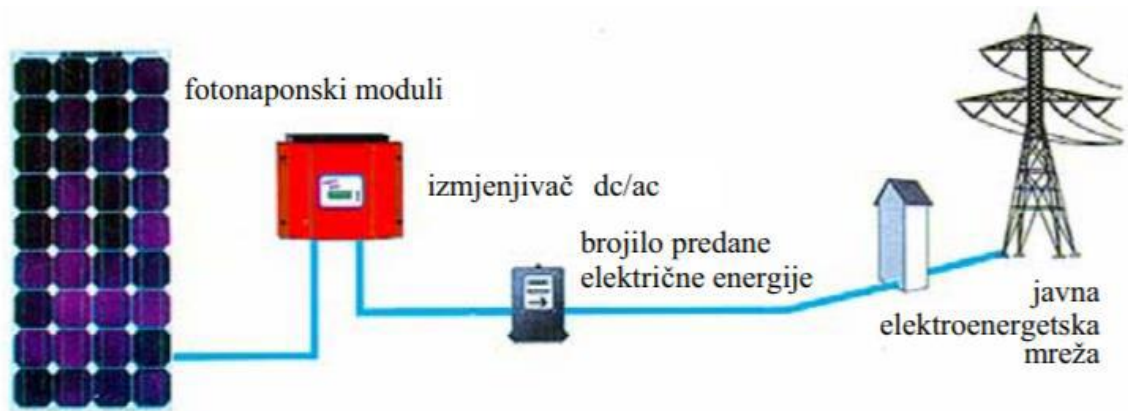
Prema slici 3.4. mrežni fotonaponski sustav se dijeli na sustav koji je izravno priključen ili na sustav koji je priključen na javnu mrežu preko kućne instalacije. Kod sustava izravno priključenih na javnu mrežu se priključuju na način da se fotonaponski sustav nakon izmjenjivača i mjernog brojila izravno spaja na javnu mrežu.

U mrežnom sustavu se solarna energija proizvodi samo kada je mreža dostupna. U slučaju nestanka električne energije napajanje se potpuno prekida. Dakle, potrebno je ovisiti o sigurnosnim tehnologijama. Do prekida napajanja dolazi uglavnom iz sigurnosnih i tehničkih razloga. Na slici 3.6. se nalazi fotonaponski sustav koji je spojen na javnu elektroenergetsku mrežu preko kućne instalacije



**Slika 3.6.** Fotonaponski sustav spojen na javnu elektroenergetsku mrežu preko kućne instalacije [5]

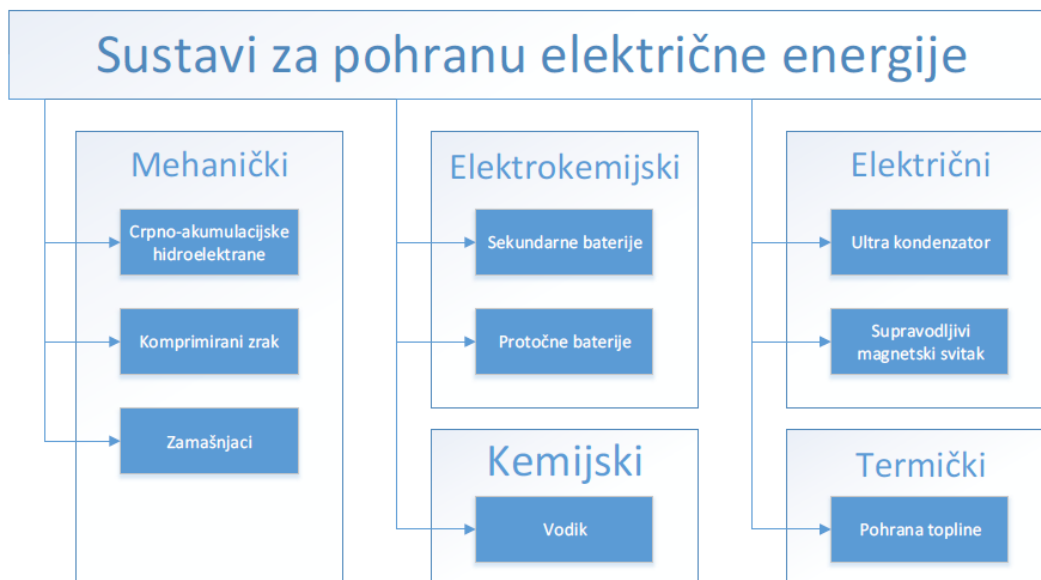
Fotonaponski sustav koji je izravno priključen na javnu elektroenergetsku mrežu nalazi se na slici 3.7.



**Slika 3.7.** Fotonaponski sustav izravno priključen na javnu elektroenergetsku mrežu [4]

## 4. POHRANA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Sustavi za pohranu električne energije se razvrstavaju prema obliku energije koja se koristi. Dijelev se na kemijske, mehaničke, električne, termalne i elektrokemijske, sustave, što se vidi na slici 4.1.



**Slika 4.1.** Podjela sustava za pohranu električne energije [6]

Osnovna podjela spremnika energije se svodi na kapacitet i snagu spremnika, odnosno na spremnike velikih, srednjih i malih snaga te velikih, srednjih i malih kapaciteta spremnika. Baterijski spremnici su svrstani u grupu srednjeg kapaciteta i snaga i izrađeni su kao elektrokemijski spremnici energije . [7]

### 4.1. Baterije

Baterije su uređaji koji sa svojim elektrokemijskim reakcijama uspostavljaju protok elektrona u krug. Reakcije uključuju prijelaz elektrona jednog materijala u drugi. Elektrokemijske reakcije se odvijaju u člancima od kojih se baterija sastoji, a u ovisnosti o traženom naponu i kapacitetu, mogu biti priključeni serijski ili paralelno. Članak sa svojom izravnom pretvorbom kemijske energije se ponaša kao izvor električne energije. Osnovni dijelovi baterije mogu se podijeliti na:

- anode (elektrode koji su negativni) koja predaje elektrone u vanjski krug
- katode (pozitivne elektrode) koja prima elektrone
- te elektrolita, odnosno medija preko kojeg se ioni između anode i katode prenose. [8]

Osnovna podjela baterije se zasniva na tome je li baterija u mogućnosti ili nemogućnosti punjenja. Po tome se razlikuju primarne i sekundarne baterije gdje kod primarnih baterija nema mogućnosti punjenja, a kod sekundarnih ima mogućnost punjenja. Bitno je napomenuti da postoje protočne ili rezervne baterije gdje je tekući elektrolit izdvojen u vanjske spremnike i rezervne baterije koje je potrebno aktivirati prije korištenja jer je elektrolit izoliran kako bi se onemogućilo samopražnjenje baterije prije uporabe. Sekundarne baterije zbog sposobnosti punjenja i pražnjenja se primjenjuju u elektroenergetskom sustavu. Od nekoliko vrsta baterija u današnjoj primjeni, bitno je naglasiti da Li-ionske baterije preuzimaju vodeću poziciju u skladištenju električne energije u elektroenergetskom sustavu. [7]

Dvije su primjene sekundarnih baterija:

1. „Primjena u kojima sekundarne baterije služe kao spremnici energije koju su uglavnom spojeni i pune se putem glavnog izvora energije i predaju akumuliranu energiju po potrebi. Primjeri su: sustavi stacionarnog spremanja energije za održavanje konstantne razine električne energije, automobilska industrija, brzi sustavi napajanja, pričuvni sustavi energije, hibridna vozila itd.“ [9]
2. „Primjena u kojima su sekundarne baterije korištene kao primarni izvor energije i koriste se kao primarne baterije, ali se nakon korištenja ponovno pune. Primjer: električna vozila, gdje je ekonomičnije koristiti punjivu bateriju umjesto odbacivanja primarne i u primjenama gdje zahtjevi za energijom nadilaze one koje mogu predati primarne baterije.“ [9]

#### 4.1.1. Punjenje i pražnjenje baterije

„Baterijama koje su korištene u mreži za skladištenje energije ili za održavanje stabilnosti mreže vrlo je važno poznavati i mjeriti razinu napunjenosti ćelije ( eng. *State of charge* - SOC). SOC se definira kao dostupnost kapaciteta izražena u Ampersatima (Ah) i izražava se postotno u odnosu na nazivni kapacitet. Uz SOC vrlo je važno definirati i životni vijek baterije (eng. *State of health* - SOH) koja predstavlja mjeru sposobnosti baterije za spremanje i isporuku električne energije. „[10]

„Za određivanje SOC-a potrebno je točno izmjeriti struju unutar i izvan ćelije, sve radne uvjete i individualne napone svih ćelija unutar oklopa. Dodatni podaci zahtijevani za izračun SOC-a uključuju temperaturu ćelije ovisno radi li se o punjenju ili pražnjenju, starost ćelije te ostale parametre dane od strane proizvođača.“ [10]

Što se tiče metoda procjene SOC i SOH, uglavnom se koriste tri pristupa:

- Coulombova metoda brojanja
- Naponska metoda
- Kalmanova filter metoda

Ove metode se mogu primijeniti na sve sustave baterija, posebno HEV (eng. *hybrid electric vehicles*), EV (eng. *electric vehicles*) i FN (eng. *photovoltaic*) - fotonapon.

Coulombova metoda je najzastupljenija tehnika računanja SOC-a. Ova metoda matematički koristi očitavanja struje baterije i integrirana tijekom upotrebe za izračun danih SOC vrijednosti..

$$SOC = SOC(t_0) + \frac{1}{C_{nazivno}} + \int_{t_0}^{t_0+\tau} (I_b - I_{gubitaka}) dt \quad (4-1)$$



gdje je:

- $SOC_{t_0}$  - početna vrijednost napunjenosti baterije
- $C_{nazivno}$  - očitana vrijednost kapaciteta baterije
- $I_b$  – struja baterije
- $I_{gubitaka}$  – struja uzrokovana gubicima u reakciji

„Coulumbova metoda brojanja tada izračunava preostali kapacitet jednostavno akumuliranjem naboja prenesenog u bateriju ili iz nje. Točnost ove metode prvenstveno pribjegava preciznom mjerenju struje baterije i točnu procjenu početnog SOC -a. Unaprijed poznati kapacitet, koji se može zapamtiti ili početno procijeniti prema radnim uvjetima, može se izračunati SOC baterije integriranjem struja punjenja i pražnjenja u radnom razdoblju. Međutim, punjenje koje se može osloboditi uvijek je manje od pohranjenog punjenje u ciklusu punjenja i pražnjenja. Drugim riječima, postoje gubici tijekom punjenja i pražnjenja. Ti gubici, uz samopražnjenje, uzrokuju greške u akumulaciji. Za preciznije SOC procjenu, te čimbenike treba uzeti u obzir. Osim toga, SOC se treba redovito ponovno kalibrirati, a deklinacija za precizniju procjenu treba razmotriti kapacitet koji se može osloboditi.“ [10]

„Druga spomenuta naponska metoda pretvara očitavanje napona baterije u SOC, koristeći poznatu krivulju pražnjenja (napon u odnosu na SOC) baterije. Međutim, na napon značajnije utječu struja baterije i temperature. Ova metoda može se učiniti preciznijom kompenzacijom očitavanja napona korekcijskim izrazom proporcionalnim struji akumulatora i uporabom pregledne tablice napona otvorenog kruga baterije u odnosu na temperaturu. Zapravo, navedeni je cilj dizajna baterija osigurati napon što je moguće konstantniji bez obzira na SOC, što otežava primjenu ove metode.“ [10]

„Kalmanov filter je algoritam za procjenu unutarnjih stanja bilo kojeg dinamičkog sustava. Također se može koristiti za procjenu SOC -a baterije. Kalmanovi filtri uvedeni su 1960. kako bi pružili rekurzivno rješenje za optimalno linearno filtriranje za probleme promatranja stanja i predviđanja. U usporedbi s drugim pristupima procjenjivanja, Kalmanov filter automatski daje granice dinamičke pogreške na temelju vlastitih procjena stanja. Modeliranjem baterijskog sustava koji u opis stanja uključuje željene nepoznate količine (kao što je SOC), Kalmanov filter procjenjuje njihove vrijednosti i daje granice pogrešaka u procjenama. Zatim postaje tehnika procjene stanja zasnovana na modelu koja koristi mehanizam za ispravljanje pogrešaka za predviđanje SOC-a u stvarnom vremenu. Može se produžiti kako bi se povećala mogućnost procjene SOH-a u stvarnom vremenu pomoću proširenog Kalmanovog filtera. Značajno je da se produženi Kalmanov filter primjenjuje kada je baterijski sustav nelinearan i potreban je korak linearizacije. Iako je Kalmanovo filtriranje internetska i dinamička metoda, potreban mu je prikladan model za bateriju i precizna identifikacija njezinih parametara. Također mu je potreban veliki računalni kapacitet i točna inicijalizacija. Druge metode za procjenu SOC -a predstavljene su u različitoj literaturi, poput spektroskopije impedancije, koja se temelji na mjerenjima impedancije ćelija, pomoću analizatora impedancije u stvarnom vremenu i za naboj i za pražnjenje. Iako se ova tehnika može koristiti za procjenu SOC i SOH Li-ionskih ćelija, izostavljena je jer se temelji na vanjskim mjerenjima pomoću instrumenata. Metode temeljene na fizikalnim svojstvima elektrolita i umjetne neuronske mreže ne vrijede za Li-ion baterije.“ [10]

Računanje preostalog kapaciteta (SOC) zasniva se na omjeru oslobođenog kapaciteta ( $C_{oslobođeno}$ ) koji označava kapacitet kada je baterija u cijelosti ispražnjena i nazivnog kapaciteta ( $C_{nazivno}$ ) koji je predan od strane proizvođača.

$$SOC = \frac{C_{oslobođeno}}{C_{nazivno}} \cdot 100\% \quad (4-2)$$

Potpuno napunjena baterija sadrži svoj maksimalni kapacitet ( $C_{max}$ ) oslobađanja koji se može razlikovati u odnosu na nazivni kapacitet.  $C_{max}$  se u propisanoj mjeri razlikuje od nazivnog kapaciteta za potpuno novu bateriju te će se vremenom korištenja baterije odbijati. Koristi se za određivanje SOH-a baterije.

$$SOH = \frac{C_{max}}{C_{nazivno}} \cdot 100\% \quad (4-3)$$

U postupku pražnjenja baterija, dubina pražnjenja (engl. *Depth of discharge*- DOD) se iskazuje kao postotak oslobođenog kapaciteta u odnosu na nazivni kapacitet.

$$DOD = \frac{C_{oslobođeno}}{C_{nazivni}} \quad (4-4)$$

Iz Coulombove učinkovitosti može se procijeniti učinkovitost baterija koja se opisuje kao omjer broja punjenja koji se može izvući iz baterije tijekom procesa pražnjenja, u odnosu na broj naboja koji ulaze u bateriju tijekom postupka punjenja.

Učinkovitost punjenja baterije opisana je izrazom:

$$\eta = \frac{C_{pražnjenja,nazivno\ min}}{C_{punjenja,nazivno\ max}} \quad (4-5)$$

Učinkovitost pražnjenja baterije opisana je izrazom:

$$\eta = \frac{(I_1 \cdot T_1) + (I_2 \cdot T_2)}{C_{max}} \quad (4-6)$$

Gdje su:

- $I_1$  i  $I_2$  – struje pražnjenja za vrijeme prve i druge faze
- $T_1$  i  $T_2$  - periodi pražnjenja za vrijeme prve i druge faze [12]

## 5. ELEKTRIČNI AUTOMOBILI

Električni automobil je automobil koji se pokreće pomoću elektromotora korištenjem električne energije pohranjene u akumulatoru ili u drugim uređajima za pohranu električne energije.

Kada se govori o električnim automobilima, postoje više vrsta na koje se mogu podijeliti:

- Hibridni automobili (eng. *HEV – hybrid electric vehicle*)
- Plug-in hibridni automobili (eng. *PHEV – plug-in electric vehicle*)
- Električni automobili produljenog doseg (eng. *E-REV – extended range electric vehicle*)
- 100 % električni automobili (eng. *EV – electric vehicle*)

### 5.1. Punjenje električnih automobila i njihove vrste priključaka

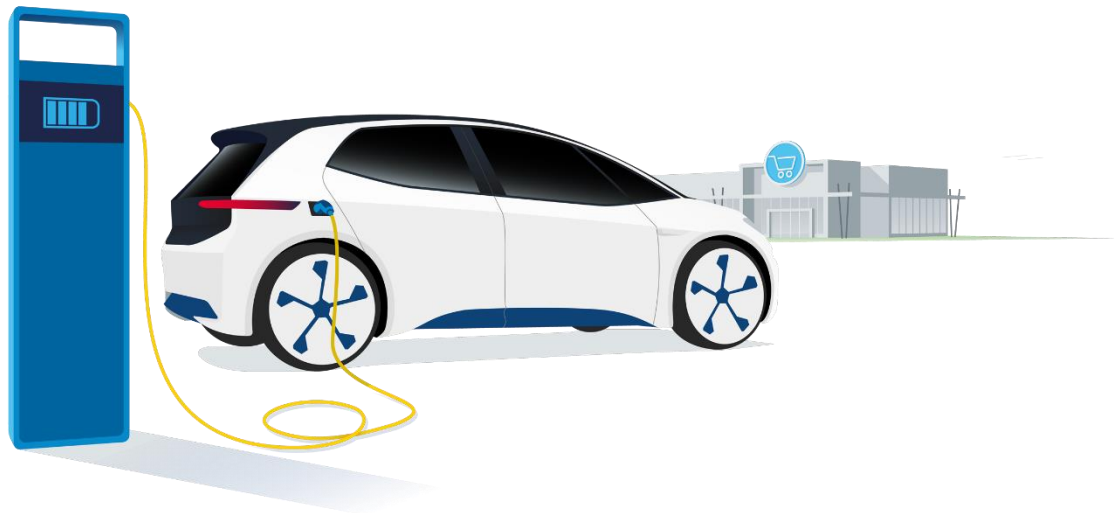
Uz navedene vrste automobila, razvija se potreba za tehnologijom punjenja električnih automobila. Gledajući na to da sami porast prodaje električnih automobila unazad nekoliko godina, potreban je daljnji razvoj i širenje e-mobilnosti, a za to je potrebno što veći razvoj mreža punionica.

Velika većina električnih automobila koriste kućne stanice za punjenje. Može se puniti priključkom na kućnu utičnicu (što je najsporiji način), putem tzv. Wallbox-a (kakav vlasnici najčešće ugrađuju u garažu ili dvorište) priključenog na mrežu kućanstva.



Slika 5.1. Wallbox punjač [13]

Kućno punjenje je danas dostupno svakom korisniku električnog vozila, ali u slučaju putovanja se to mijenja. Zbog porasta korištenja električnih vozila, može nastati problem u slučaju da se baterija isprazni, odnosno da se počnu stvarati gužve oko javnih punionica za punjenje. Javne stanice za punjenje električnih vozila se sve više instaliraju na mjestima kao što su parkirališta, benzinskim crpkama i slično.[14]



**Slika 5.2.** Električni automobil priključen na punionicu [15]

Kako bi se lakše shvatila tehnologija punjenja električnih vozila, moraju se istaknuti pojmovi koji se upotrebljavaju u infrastrukturi punjenja električnih vozila.

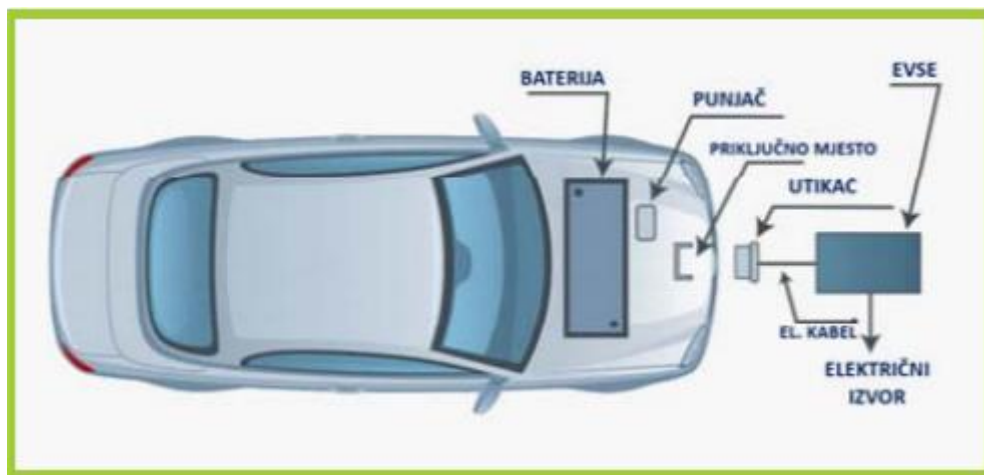
Jedinica za napajanje energijom - oprema koji jamči električnu energiju za punjenje, mogu se podijeliti na kućnu i javnu.

Priključak za vozila - naprava koji osigurava fizičku vezu između vozila i opreme za napajanje električnog vozila gdje ne postoji jedinstveni tip priključka, već nekoliko standardnih tipova priključaka koji koriste proizvođači električnih vozila.

Priključak na električnom vozilu – Omogućuje vezu između priključka i električnog vozila. Postoje više vrsta priključaka na električnom vozilu, kao što postoje i više tipova priključaka za vozila. Nalazi se na istom mjestu kao i kod vozila s unutarnjim izgaranjem gdje se nalazi poklopac za gorivo.

Punjač za baterije – uređaj koji služi za pretvaranje izmjenične struje u istosmjernu struju koja je nužna za punjenje baterije električnog vozila. U slučaju kada se istosmjerna struja provodi do baterije, punjač baterije nije potreban, ali je zato njegova funkcija pratiti proces punjenja.

Baterije električnog vozila – jamči potrebnu energiju za pogon električnih vozila. Postoje više različitih vrsta baterija koje se po svojoj energiji, masi i kapacitet razlikuju. Što je veći kapacitet energije veća je autonomija kretanja. Danas se najviše koristi litij-ionske baterije. [14]



**Slika 5.3.** Sustav za punjenje električnog vozila [14]

Priključci na automobilu se dijele na priključke za AC punjenje i na priključke za DC punjenje, a danas se koriste priključci koji sadrže AC i DC punjenje. Priključci za AC punjenje dijele se na:

- Tip 1 – Jednofazni priključak prema SAE J1772-2009 standardu
- Tip 2 – Jednofazni i trofazni priključak prema VDE-AR-E 2623-2-2 standardu
- Tip 3 – Jednofazni i trofazni priključak sa zaštitnim poklopcem prema EV Plug Alliance standardu.

Za punjenje električnih vozila postoje različiti standardi koji se određuju prema regijama u kojima se koriste ili primjenjuju. U Sjevernoj Americi se koristi standard SAE-J1772, dok se u Europi primjenjuje IEC-62196 standard. Norma IEC-62196 je međunarodna norma nastala 2001. godine od Međunarodnog elektrotehničkog povjerenstva (IEC- *International Electrotechnical Commission*). Norma IEC 62196 koja je proizašla iz IEC-61851 omogućuje prvu klasifikaciju tipa punjenja prema njegovoj nazivnoj snazi, a time i vremenu punjenja.

SAE J1772, još poznat kao J utikač, sjevernoamerički je standard za električne konektore za električne automobile koji održavaju, pod službenim nazivom „SAE Surface Vehicle Recommend Practice J1772, SAE Electric Vehicle Conductive Charge Coupler“. Yazaki utikač koji je izgrađen prema standardu utikača SAE J1772 uspješno je završio certifikaciju na UL. Standardna specifikacija kasnije je izglasana od strane SAE odbora u srpnju 2009. [16] Jedne od firmi koje podržavaju spomenuti standard iz 2009. godine su Ford, Toyota, Tesla, Nissan, Honda itd.



**Slika 5.4.** J1772 konektor s utičnicom [16]

VDE-AR-E 2623-2-2, izvorno predložen kao standard od njemačke tvrtke Mennekes, a sada je kao standard za AC punjenje preporučen od strane Udruženja europskih proizvođača automobila (ACEA - Association des Constructeurs Européens d'Automobiles) te zamjenjuje SAE J1772. [14]



**Slika 5.5.** VDE-AR-E 2623-2-2 konektor s utičnicom [17]

Francuske tvrtke Schneider Electric i Legrand i talijanska tvrtka Scame su zajedno udruženjem došli do EV Plug Alliance-a koje imaju dvije varijante konektora, konektor tipa 3A i konektor 3B. Konektor tip 3A nastao je iz Scame konektora i on je predviđen za jednofazno punjenje, te se on najčešće koristi za električne motocikle ili skutere, a konektor tipa 3B se koristi za trofazno punjenje. Na području Europske unije je u 2013. godini dogovoreno za standardni konektor da bude Mennekesov konektor, dok je u Francuskoj odlučeno da će se zadržati EV Plug Alliance standard.



**Slika 5.6.** EV Plug Alliance konektor [18]



Od ostalih priključaka kojih se koristi danas osim u Europi su CHAdeMO, CCS (eng. *Combined Charging System*) i Tesla priključak. Brze stanice za punjenje priključkom CHAdeMO se ponajviše koriste u Aziji točnije Japanu, dok su CCS i Tesla priključci koriste u Sjevernoj Americi. Na slici 5.7. nalazi se CHAdeMO priključak.



**Slika 5.7.** CHAdeMO priključak [19]

CCS 1 i CCS 2 priključci se nalaze na slici 5.8.



**Slika 5.8.** CCS 1 i CCS 2 [20]

Na slici 5.9. nalazi se Tesla priključak.



**Slika 5.9.** Tesla priključak [21]

## 6. MATEMATIČKI OPIS MODELA

### 6.1. Funkcija cilja za minimizaciju ukupnih troškova

U cilju ostvarenja minimizacije ukupnih troškova u kućanstvu u periodu „t“ koje je definirano kao t=1-24 h zadana je relacija:

$$\min \left\{ \sum_{t=1}^{nt} (P_{k_t} \cdot C_{k_t} - P_{P_t} \cdot C_{P_t}) - \lambda_f \cdot (SOC_{n_t} + SOCa_{n_t}) \right\} \quad (6-1)$$

gdje je:

- $P_{k_t}$  - električna energija kupljena iz mreže u periodu  $t$
- $C_{k_t}$  – cijena kupljene električne energije iz mreže u periodu  $t$
- $P_{P_t}$  – električna energija prodana u mrežu u periodu  $t$
- $C_{P_t}$  – cijena prodane električne energije u mrežu u periodu  $t$
- $\lambda_f$  – buduća cijena po kojoj se očekuje prodaja preostale električne energije u stacionarnom baterijskom spremniku i u bateriji električnog automobila, za ovaj slučaj jednaka je  $C_{P_t}$
- $SOC_{n_t}$  – stanje napunjenosti stacionarnog baterijskog spremnika u zadnjem periodu
- $SOCa_{n_t}$  – stanje napunjenosti baterije električnog automobila u zadnjem periodu
- $n_t$  – period simulacije

Prvi član relacije, odnosno umnožak kupljene električne energije iz mreže i cijene, označava trošak pri kupovini električne energije iz mreže koji se umanjuje za prihod ostvaren prodajom električne energije u mrežu što predstavlja drugi dio relacije, za svaki period  $t$ . Umnožak buduće cijene električne energije i količine napunjenosti stacionarnog baterijskog spremnika i spremnika električnog automobila predstavlja očekivanu prodaju preostale pohranjene električne energije, a odnosi se na zadnji period. Period simulacije odnosi se na satne vrijednosti.

Jednadžba balansa električne energije zadana je sljedećom relacijom:

$$P_{l_t} + P_{ch1_t} \cdot b_{1_t} + P_{ch2_t} \cdot b_{2_t} + P_{ch_t} - P_{v_t} - P_{dis_t} - P_{k_t} + P_{p_t} = 0 \quad (6-2)$$

Gdje je:

- $P_{l_t}$  – potražnja električne energije u kućanstvu u periodu  $t$
- $P_{ch1_t}$  – niža razina snage, električna energija potrebna za punjenje automobila u periodu  $t$
- $P_{ch2_t}$  – viša razina snage, električna energija potrebna za punjenje automobila u periodu  $t$
- $P_{ch_t}$  – električna energija potrebna za punjenje stacionarnog baterijskog spremnika u periodu  $t$
- $P_{v_t}$  – očekivana proizvodnja električne energije iz fotonaponske elektrane u periodu  $t$
- $P_{dis_t}$  – električna energija dobivena iz stacionarnog baterijskog spremnika u periodu  $t$
- $b_{1_t}$  – binarna varijabla odluke, niža razina snage punjenja u periodu  $t$
- $b_{2_t}$  – binarna varijabla odluka, viša razina snage punjenja u periodu  $t$

Punjenje stacionarnog baterijskog spremnika opisuje se sljedećom relacijom:

$$Q_{ch_t} = \sum_{k=1}^{nk} \mu_k \cdot P_{ch_{k_t}} \quad (6-3)$$

Varijabla  $P_{ch_{k_t}}$  predstavlja energiju koja je potrebna za punjenje baterije dok  $\mu_k$  označava korisnost punjenja. Zbog više različitih intervala punjenja, korisnost  $\mu_k$  nije uvijek jednaka. Kod manjih snaga punjenja je koeficijent korisnosti punjenja veći, a kod većih snaga je koeficijent korisnosti punjenja manji.

Ukupno potrebna električna energija za punjenje stacionarne baterije se opisuje sljedećom relacijom:

$$P_{ch_t} = \sum_{k=1}^{nk} P_{ch_{kt}} \quad (6-4)$$

Pražnjenje stacionarnog baterijskog spremnika opisuje se sljedećom relacijom:

$$Q_{dis_t} = \sum_{j=1}^{nj} \frac{1}{\eta_j} \cdot P_{dis_{jt}} \quad (6-5)$$

U slučaju pražnjenja baterijskog spremnika se upotrebljava koeficijent korisnosti pražnjenja. Kada se koeficijent korisnosti pražnjenja prebaci s desne strane jednakosti jednadžbe dobije se faktor  $\frac{1}{\eta_j}$ .

Ukupna električna energija dobivena pražnjenjem stacionarnog baterijskog spremnika opisuje se sljedećom relacijom:

$$P_{dis_t} = \sum_{j=1}^{nj} P_{dis_{jt}} \quad (6-6)$$

Stanje napunjenosti stacionarnog baterijskog spremnika zadano je relacijom, za  $t \neq 1$ :

$$SOC_t = SOC_{t-1} + Q_{ch_t} - Q_{dis_t} \quad t \neq 1 \quad (6-7)$$

gdje je:

- $SOC_t$  – stanje napunjenosti stacionarnog baterijskog spremnika na kraju perioda  $t$
- $SOC_{t-1}$  – stanje napunjenosti stacionarnog baterijskog spremnika za prošli period ( $t-1$ )
- $Q_{ch_t}$  – količina električne energije s kojom je napunjen stacionarni baterijski spremnik u periodu  $t$
- $Q_{dis_t}$  – dobivena količina električne energije stacionarnog baterijskog spremnika u periodu  $t$

Stanje napunjenosti stacionarnog baterijskog spremnika zadano je relacijom, za  $t = 1$ , odnosno za prvi period:

$$SOC_t = SOC_{start} + Q_{ch_t} - Q_{dis_t} \quad t = 1 \quad (6-8)$$

gdje je:

- $SOC_{start}$  – stanje napunjenosti stacionarnog baterijskog spremnika na početku prvog perioda ( $t_1$ )

Punjenje baterije električnog automobila koristeći koeficijent korisnosti punjenja  $\alpha$  opisuje se sljedećom relacijom:

$$Q_{a_t} = P_{a_t} \cdot \alpha = (P_{ch1} \cdot b_{1_t} + P_{ch2} \cdot b_{2_t}) \cdot \alpha \quad (6-9)$$

gdje je:

- $Q_{a_t}$  – količina električne energije s kojom je napunjena baterija električnog automobila u periodu  $t$

Stanja napunjenosti baterije električnog automobila zadano je relacijom, za  $t \neq 1$ :

$$SOC_{a_t} = SOC_{a_{t-1}} + Q_{a_t} \quad t \neq 1 \quad (6-10)$$

gdje je:

- $SOC_{a_{t-1}}$  – stanje napunjenosti baterije električnog automobila za prošli period ( $t-1$ )

Stanje napunjenosti baterije električnog automobila zadano je relacijom, za  $t = 1$ , odnosno za prvi period:

$$SOC_{a_t} = SOC_{a_{start}} + Q_{a_t} \quad t = 1 \quad (6-11)$$

gdje je:

- $SOC_{a_{start}}$  – stanje napunjenosti baterije električnog automobila na početku perioda ( $t_1$ )

Ograničenje maksimalne trenutne snage punjenja električnog automobila u periodu  $t$  je definirano na sljedeći način:

$$0 \leq P_{a_t} \leq P_{a_{max}} \quad (6-12)$$

Ograničenje maksimalne trenutne snage punjenja stacionarnog baterijskog spremnika u periodu  $t$ , definirano je na sljedeći način:

$$0 \leq P_{ch_t} \leq P_{ch_{max}} \quad (6-13)$$

Ograničenje maksimalne trenutne snage pražnjenja stacionarnog baterijskog spremnika u periodu  $t$ , definirano je na sljedeći način:

$$0 \leq P_{dis_t} \leq P_{dis_{max}} \quad (6-14)$$

Ograničenje stanja napunjenosti stacionarnog baterijskog spremnika, definirano je na sljedeći način:

$$SOC_{min} \leq SOC_t \leq SOC_{max} \quad (6-15)$$

Ograničenje stanja napunjenosti baterije električnog automobila definiramo na sljedeći način:

$$SOC_{a_{min}} \leq SOC_{a_t} \leq SOC_{a_{max}} \quad (6-16)$$

Ograničenje maksimalne kupljene snage iz mreže u periodu  $t$ , definirano je na sljedeći način:

$$0 \leq P_{k_t} \leq P_{k_{max}} \quad (6-17)$$

Ograničenje maksimalne prodane trenutne snage u mrežu u periodu  $t$ , definirano je na sljedeći način:

$$0 \leq P_{p_t} \leq P_{p_{max}} \quad (6-18)$$

Ograničenja binarnih varijabli punjenja baterije električnog automobila definirana su:

$$0 \leq b_{1_t} \leq 1 \quad (6-19)$$

$$0 \leq b_{2_t} \leq 1$$

Ograničenje istovremenog punjenja baterije električnog automobila s dvije razine snage definirano je:

$$b_{1_t} + b_{2_t} \leq 1 \quad (6-20)$$



## 7. REZULTATI SIMULACIJE

### 7.1. Priprema ulaznih podataka

Prije početka izvršavanje same simulacije, potrebno je definirati ulazne podatke.

Odabrano je električno vozilo koje kućanstvo sadrži te stacionarni baterijski spremnik u kojem će se skladištiti električna energije koju proizvodi fotonaponska elektrana. Za ovaj diplomski rad će se koristiti Hyundai Kona Electric 39 kWh koji se nalazi na slici 7.1.



**Slika 7.1.** Hyundai Kona Electric [22]

Specifikacija baterije električnog automobila i njezinog punjenja nalaze se u tablici 7.1.:

**Tablica 7.1.** Specifikacija baterije i punjenja Hyundai Kona Electric-a [22]

Hyundai Kona Electric 39 kWh					
Vrsta baterije	Kapacitet baterije	Upotrebljivost baterije	Vrsta priključka	Snaga punjenja	Snaga brzog punjenja
Litij - ionska	42 kWh	39,2 kWh	Type 1/Type 2	2,7 i 11 kW AC	50 kW DC

Za skladištenje viška proizvedene električne energije iz fotonaponske elektrane odabran je FREEDOM baterijski spremnik od 40 kWh koji se nalazi na slici 7.2.



**Slika 7.2.** FREEDOM baterijski spremnik [23]

Specifikacija navedenog baterijskog spremnika nalazi se u tablici 7.2.:

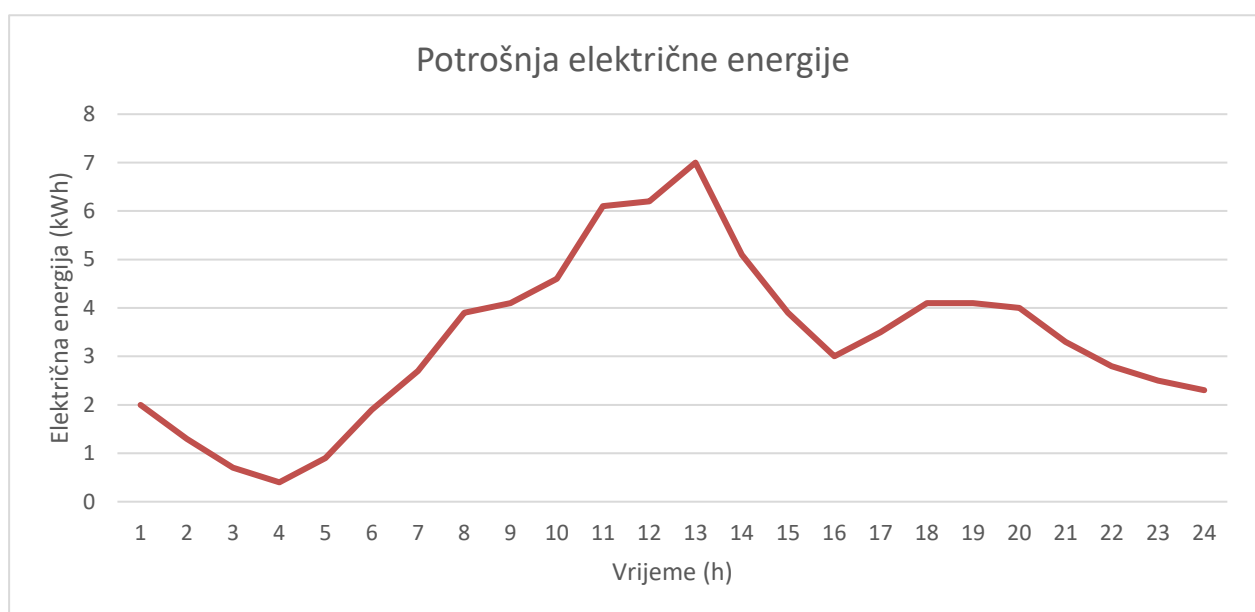
**Tablica 7.2.** Specifikacija FREEDOM baterijskog spremnika [23]

FREEDOM				
Vrsta baterije	Kapacitet baterije	Upotrebljivost baterije	Maksimalna snaga punjenja	Maksimalna učinkovitost u cijelom intervalu
Litij - ion	40 kWh	40 kWh	15 kW	92 %

Postavljeno je da kućanstvo posjeduje fotonaponsku elektranu instalirane snage od 10 kW na svome krovu. U ovom radu za pripremu podataka solarnog zračenja, odnosno proizvedene električne energije, se koristio PVGIS (eng. *Photovoltaic Geographical Information System*). Podaci solarnog zračenja koje koristi PVGIS sastoji se od vrijednosti za svaki sat u razdoblju od nekoliko godina, na temelju podataka sa satelita. Ovaj dio PVGIS -a omogućuje preuzimanje cijelog skupa podataka o satu za sunčevo zračenje i/ili izlaznu snagu fotonaponske elektrane za odabrano mjesto. Odabrano mjesto za ovaj diplomski rad je grad Osijek. Za početak analize, odabrana su dva dana u godini za potrošnju električne energije jednog kućanstva. Jedan dan u 1. mjesecu i jedan dan u 6. mjesecu.

**Tablica 7.3.** Potrošnja kućanstva za jedan u 1. mjesecu.

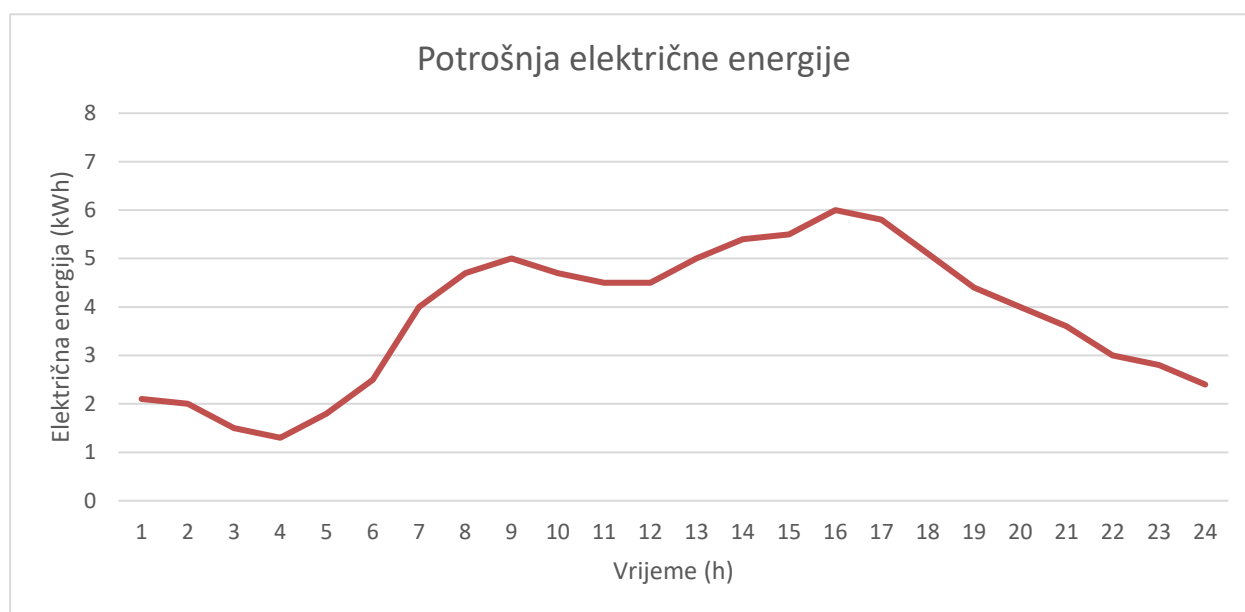
Vrijeme (h)	Ukupna proizvodnja (kWh)	Vrijeme (h)	Ukupna proizvodnja (kWh)	Vrijeme (h)	Ukupna proizvodnja (kWh)	Vrijeme (h)	Ukupna proizvodnja (kWh)
1	2	7	2,7	13	7	19	4,1
2	1,3	8	3,9	14	5,1	20	4
3	0,7	9	4,1	15	3,9	21	3,3
4	0,4	10	4,6	16	3	22	2,8
5	0,9	11	6,1	17	3,5	23	2,5
6	1,9	12	6,2	18	4,1	24	2,3



**Slika 7.3.** Grafički prikaz potrošnje kućanstva za jedan dan u 1. mjesecu

**Tablica 7.4.** Potrošnja kućanstva za jedan dan u 6. mjesecu

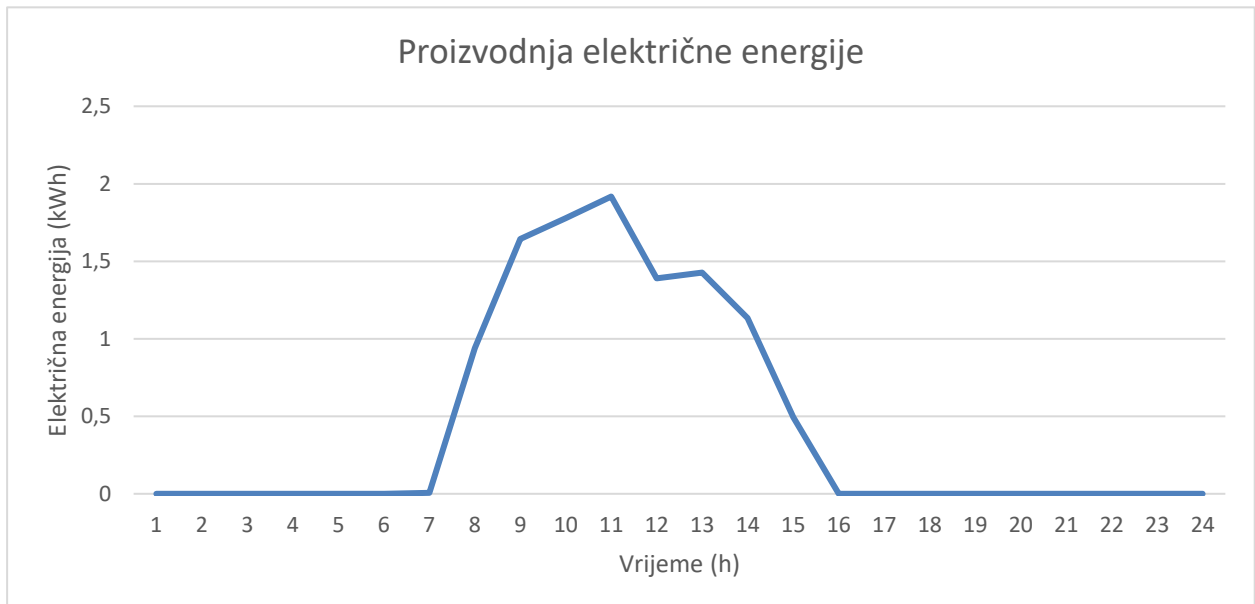
Vrijeme (h)	Ukupna proizvodnja (kWh)	Vrijeme (h)	Ukupna proizvodnja (kWh)	Vrijeme (h)	Ukupna proizvodnja (kWh)	Vrijeme (h)	Ukupna proizvodnja (kWh)
1	2,1	7	4	13	5	19	4,4
2	2	8	4,7	14	5,4	20	4
3	1,5	9	5	15	5,5	21	3,6
4	1,3	10	4,7	16	6	22	3
5	1,8	11	4,5	17	5,8	23	2,8
6	2,5	12	4,5	18	5,1	24	2,4

**Slika 7.4.** Grafički prikaz potrošnje kućanstva na dan u 6. mjesecu

Za proizvodnju električne energije su se koristili već spomenuti podaci solarnog zračenja, preuzeti s PVGIS-a. Uzeti su podaci proizvodnje električne energije za instaliranu fotonaponsku elektranu za tri dana u nizu u 1. mjesecu ( 9.1., 10.1., i 11.1.) i za tri dana u nizu u 6. mjesecu (15.6., 16.6. i 17.6.) i tako za 3 različite godine ( 2014., 2015. i 2016.) te se uzeo prosjek proizvedene električne energije po satu za navedene dane, odnosno godine.

**Tablica 7.5.** Prosjek proizvedene električne energije za tri dana u nizu u 1. mjesecu

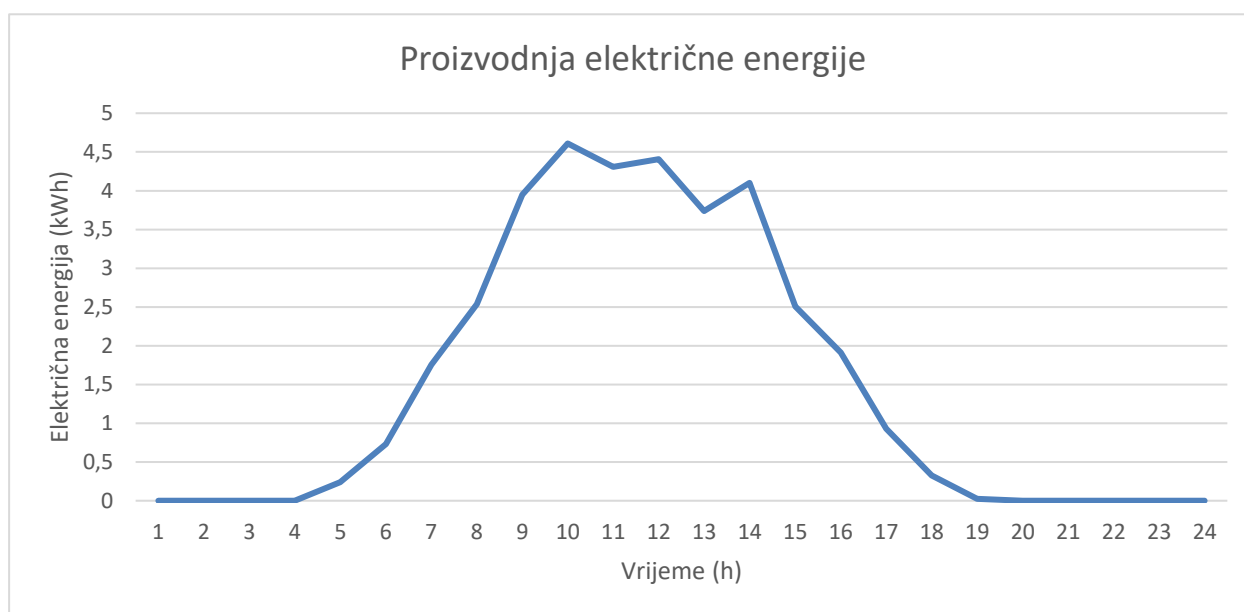
Vrijeme (h)	Ukupna proizvodnja (kWh)	Vrijeme (h)	Ukupna proizvodnja (kWh)	Vrijeme (h)	Ukupna proizvodnja (kWh)	Vrijeme (h)	Ukupna proizvodnja (kWh)
1	0	7	0	13	1,43	19	0
2	0	8	0,94	14	1,13	20	0
3	0	9	1,64	15	0,49	21	0
4	0	10	1,78	16	0	22	0
5	0	11	1,92	17	0	23	0
6	0	12	1,39	18	0	24	0



**Slika 7.5.** Grafički prikaz prosjeka proizvedene električne energije za tri dana u nizu u 1. mjesecu

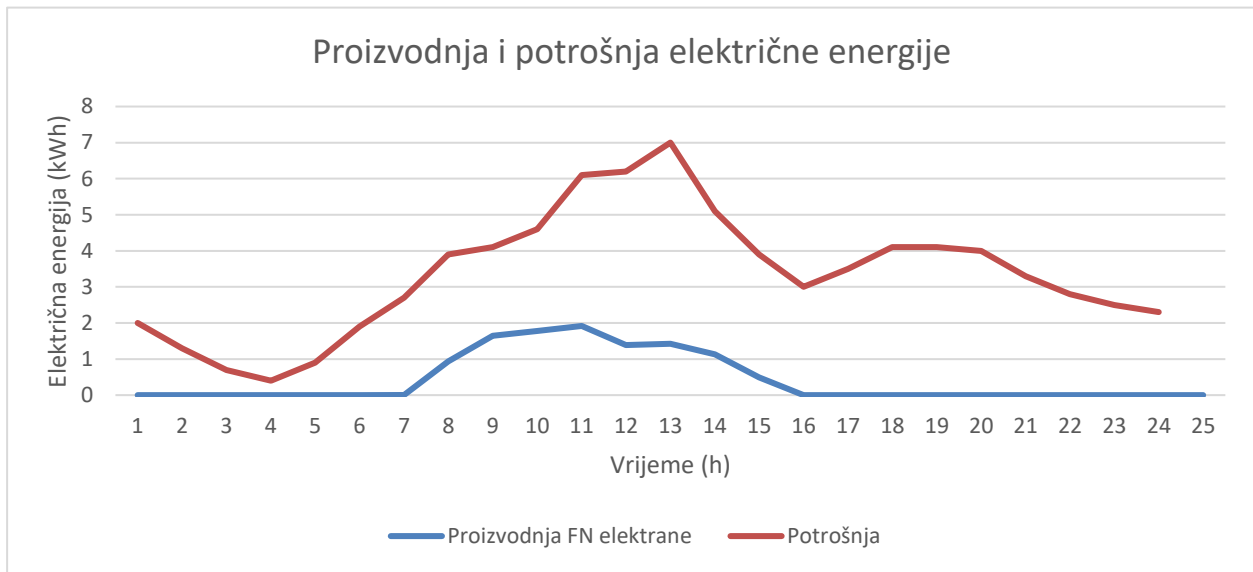
**Tablica 7.6.** Prosjek proizvedene električne energije za tri dana u nizu u 6. mjesecu

Vrijeme (h)	Ukupna proizvodnja (kWh)	Vrijeme (h)	Ukupna proizvodnja (kWh)	Vrijeme (h)	Ukupna proizvodnja (kWh)	Vrijeme (h)	Ukupna proizvodnja (kWh)
1	0	7	1,76	13	3,74	19	0,03
2	0	8	2,54	14	4,1	20	0
3	0	9	3,95	15	2,51	21	0
4	0	10	4,61	16	1,92	22	0
5	0,24	11	4,31	17	0,93	23	0
6	0,73	12	4,41	18	0,33	24	0



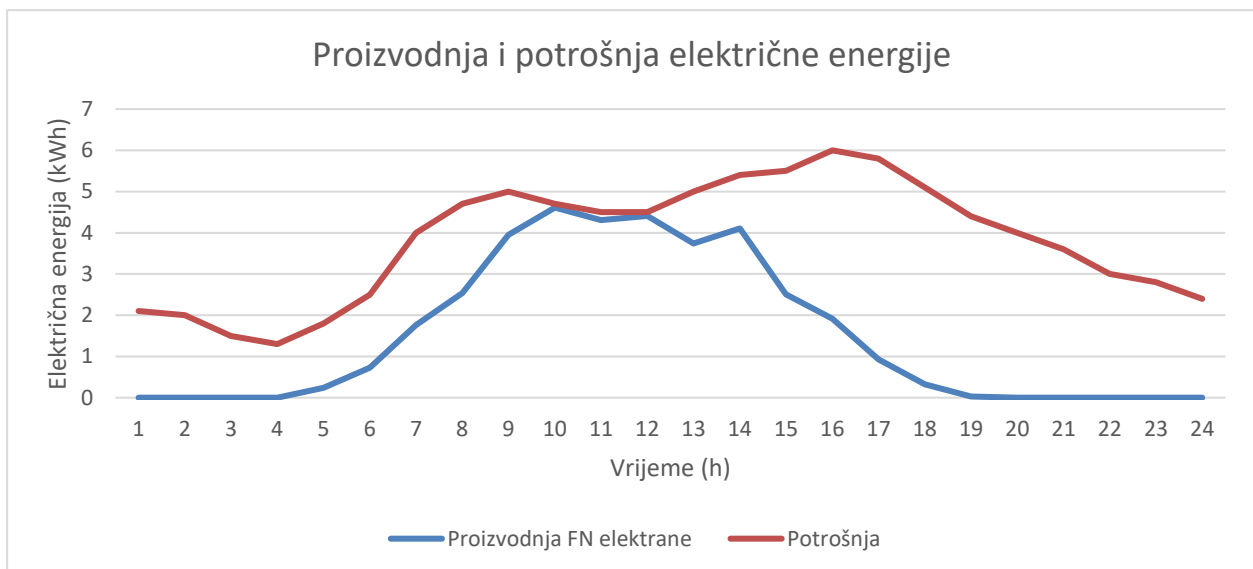
**Slika 7.6.** Grafički prikaz prosjeka proizvedene električne energije za tri dana u nizu u 6. mjesecu

Na slici 7.7. je prikazan grafički prikaz proizvodnje električne energije za tri dana u nizu u 1. mjesecu i potrošnje električne energije za jedan dan u 1. mjesecu.



**Slika 7.7.** Grafički prikaz proizvodnje električne energije za tri dana u nizu u 1. mjesecu i potrošnje električne energije za jedan dan u 1. mjesecu

Na slici 7.8. je prikazan grafički prikaz proizvodnje električne energije za tri dana u nizu u 6. mjesecu i potrošnje električne energije za jedan dan u 6. mjesecu.



**Slika 7.8.** Grafički prikaz proizvodnje električne energije za tri dana u nizu u 1. mjesecu i potrošnje električne energije za jedan dan u 1. mjesecu

Potrebno je znati izračun troškova za kućanstvo gdje se razlikuje visoka i niska tarifa. Potrebno je napomenuti da se u ovome radu koristi bijeli tarifni model koji uključuje VT (visoka tarifa) i NT (niska tarifa). Trajanje više i niže dnevne tarife:

- Zimsko računanje vremena: VT od 07-21 sat, NT od 21-07 sati,
- Ljetno računanje vremena: VT od 08-22 sata, NT od 22-08 sati

Na slici 7.9. je prikazan iznos 1 kWh za visoku tarifu i nisku tarifu.

Izračun				Izračun			
Stavka	Količina [ kWh ]	Cijena [ Kn ]	Iznos [ Kn ]	Stavka	Količina [ kWh ]	Cijena [ Kn ]	Iznos [ Kn ]
➤ energija	1		0.49	➤ energija	1		0.24
➤ prijenos	1		0.11	➤ prijenos	1		0.05
➤ distribucija	1		0.24	➤ distribucija	1		0.12
			0.84				0.41

**Slika 7.9.** Iznos 1 kWh za visoku tarifu (lijevo) i nisku tarifu (desno)

U konačnici nakon dodanog PDV-a od 13% i naknade za obnovljive izvore i visokoučinkovite kogeneracije u iznosu od 0,105 kn/kWh, cijena električne energije za visoku tarifu iznosi:

$$C_{K,D} = (0,84 + 0,105) \cdot 1,13 = 1,07 \text{ kn/kWh} \quad (7-1)$$

Dok za nisku tarifu iznosi:

$$C_{K,N} = (0,41 + 0,105) \cdot 1,13 = 0,58 \text{ kn/kWh} \quad (7-2)$$

Iznos cijene električne energije po kojoj se radi prodaja u mrežu od strane aktivnog kupca, iznosi 0,33 kn/kWh, a računa se po relaciji :

$$C_p = 0,9 \cdot \frac{0,49 + 0,24}{2} = 0,33 \text{ kn/kWh} \quad (7-3)$$

U ovom diplomskom radu, simulacija je izvršena u programskom jeziku GAMS. GAMS je sustav modeliranja koji se koristi na visokoj razini za matematičku optimizaciju. Dizajniran je za



modeliranje i rješavanje problema optimizacije linearnih, nelinearnih i mješovitih optimizacijskih problema.

Unutar GAMS programskom jezika su razrađena tri različita scenarija:

1. Scenarij – kućanstvo sadrži električni automobil s dvije razine snage punjenja i proizvodnju FN elektrane
2. Scenarij- kućanstvo sadrži električni automobil s dvije razine snage punjenja, proizvodnju FN elektrane i stacionarni baterijski spremnik s diskretnim razinama snage punjenja u tri intervala
3. Scenarij - kućanstvo sadrži električni automobil sa dvije razine snage punjenja, proizvodnju FN elektrane i stacionarni baterijski spremnik s kontinuiranom razinom snage punjenja

Ulazni podaci su:

- Potrošnja električne energije
- Proizvodnja električne energije
- Cijena kupljene električne energije
- Cijena prodane električne energije
- Vrijeme visoke i niske tarife
- Specifikacija parametara električnog automobila
- Specifikacija parametara stacionarnog baterijskog spremnika

Modeli omogućuju promjenu nekih od parametara prema želji korisnika, a to su:

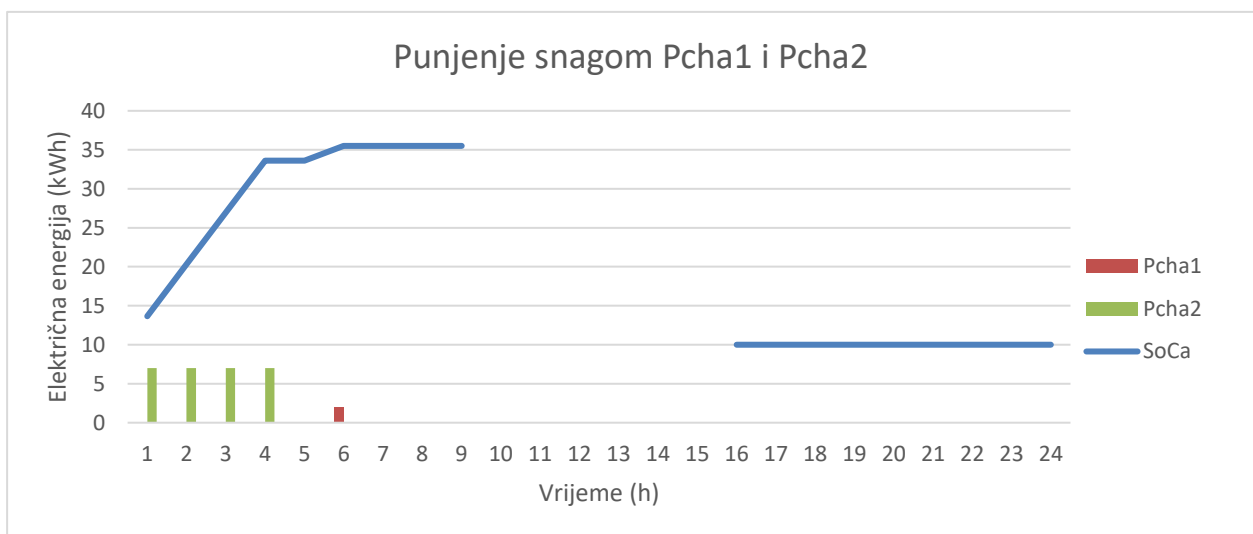
- Maksimalno i minimalno stanje napunjenosti baterije električnog automobila
- Maksimalno i minimalno stanje napunjenosti stacionarnog baterijskog spremnika
- Prisutnost električnog automobila za punjenje

Unutar ovih scenarija postoje ograničene snage koju kućanstvo može kupiti unutar jednog intervala (13,8 kW), odnosno prodati unutar jednog intervala (10 kW). Također postoje i ograničene razine snaga s kojom se električni automobil može puniti (2 kW i 7 kW) i s kojom se stacionarni baterijski spremnik može puniti i prazniti (3 kW, 7 kW i 15 kW) ili kontinuirani do maksimalne snage (15 kW). Učinkovitosti punjenja i pražnjenja električnog automobila i stacionarnog baterijskog spremnika su definirani u modelima. Za slučaj automobila korisnost punjenja iznosi 0,95, dok za slučaj baterijskog spremnika iznosi 0,92 što jamči proizvođač.

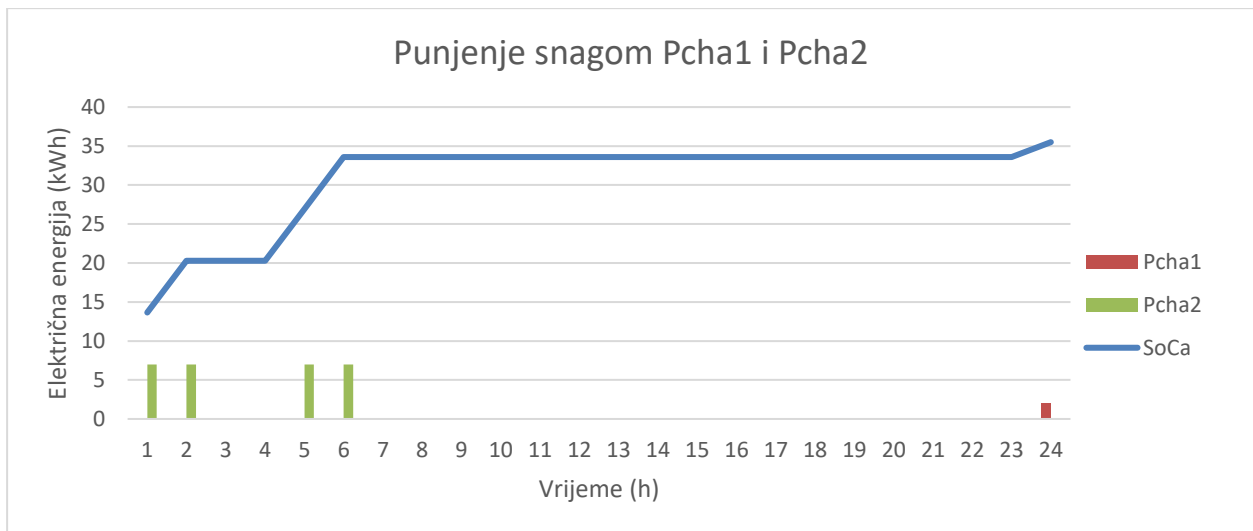
Za svaki scenarij i za odabrane dane u 1. i 6. mjesecu, postojat će dva slučaja. U prvom slučaju je opisan radni dan u kojem je električni automobil u periodu od 10 h do 16 h nije dostupan za punjenje, a u drugom slučaju je opisan neradni dan u kojem je električni automobil cijeli dan dostupan za punjenje.

## 7.2. Scenarij 1 – dan u 6. mjesecu

U prvom scenariju, definirana su dva dana (radni i neradni dan) za 6. i 1. mjesec te periodi punjenja električnog automobila unutar tih dana. Za ljetno računanje vremena, definirano je da je trajanje niske tarife od 22 h do 08 h, odnosno trajanje visoke tarife od 08 h do 22 h. Kućanstvo u prvom scenariju sadrži električni automobil i FN elektranu. Za električni automobil su se koristile dvije razine snage punjenja gdje prva razina snage punjenja iznosi 2 kW, a druga razina snage punjenja iznosi 7 kW. Učinkovitost punjenja i pražnjenja električnog automobila je  $\eta = 95\%$ .



**Slika 7.10.** Punjenje električnog automobila snagom Pcha1 i Pcha2 za period nekorištenja od 10 h do 16 h



**Slika 7.11.** Punjenje električnog automobila snagom Pcha1 i Pcha2 u periodu od 0 h do 24 h

Na slici 7.10. baterija električnog automobila se punila drugom razinom snage na početku dana dok je pri niskoj tarifi. Uz proizvodnju FN elektrane, električni automobil se puni prvom razinom snage kako bi se napunio do postavljene razine stanja napunjenosti baterije u 10 h. Vozilo se vratilo sa stanjem napunjenosti u 16 h u iznosu od 10 kWh

Na slici 7.11. baterija električnog automobila je bila dostupna na punjenju tokom cijelog dana. Također se na početku dana počela puniti s drugom razinom snage punjenja dok je trajala niska tarifa, a ostatak dana, za vrijeme visoke tarife je razina napunjenosti ostala nepromijenjena sve do zadnjeg sata kada se iskoristila niska tarifa da postigne postavljenu vrijednost razine stanja napunjenosti baterije u 24 h.

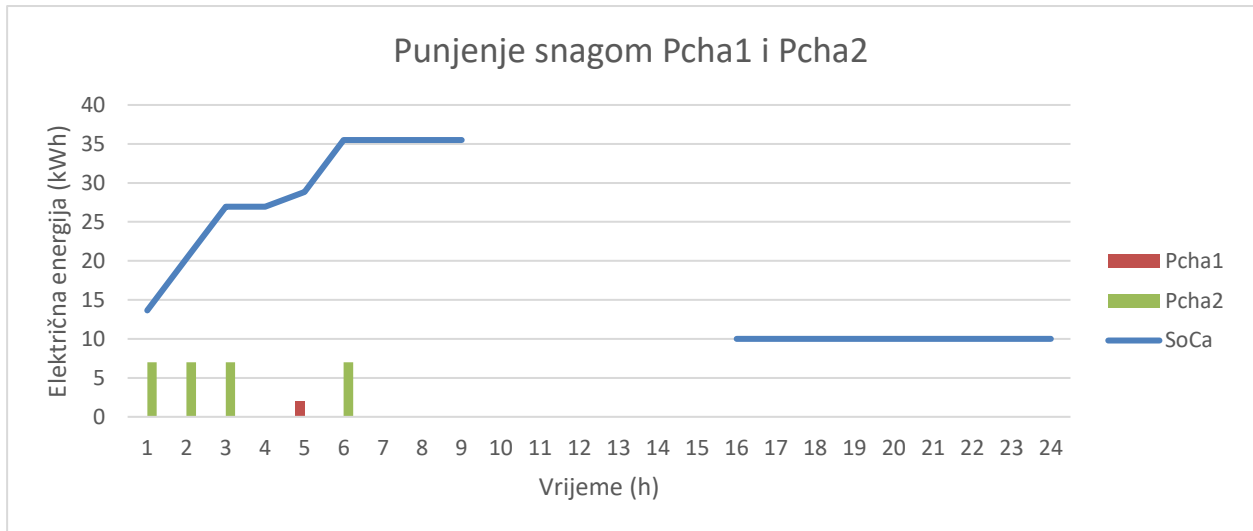
Prema tablici 7.7., gledajući oba zadana slučaja, vidljivo je kako nije došlo do uštede iz razloga što u 1. scenariju ne postoji mogućnost skladištenja električne energije, budući da nema stacionarnog baterijskog spremnika.

**Tablica 7.7.** Kupljena električna energija i trošak kupljene električne energije za dan u 6. mjesecu

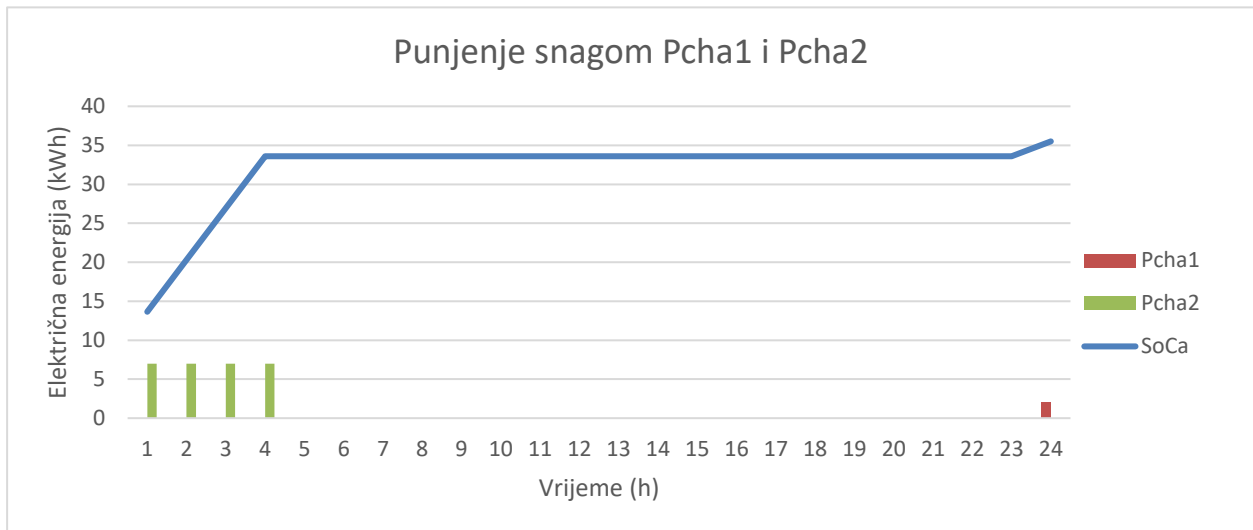
	Radni dan		Neradni dan	
	Kupljena energija iz mreže [kWh]	Trošak kupljene energije [kn]	Kupljena energija iz mreže [kWh]	Trošak kupljene energije [kn]
t1	9,1	5,28	9,1	5,28
t2	9	5,22	9	5,22
t3	8,5	4,93	1,5	0,87
t4	8,3	4,81	1,3	0,75
t5	1,560	0,90	8,560	4,96
t6	3,770	2,19	8,770	5,09
t7	2,243	1,30	2,243	1,30
t8	2,163	2,31	2,163	2,31
t9	1,053	1,13	1,053	1,13
t10	0,090	0,10	0,090	0,10
t11	0,192	0,21	0,192	0,21
t12	0,095	0,10	0,095	0,10
t13	1,263	1,35	1,263	1,35
t14	1,298	1,39	1,298	1,39
t15	2,992	3,20	2,992	3,20
t16	4,088	4,37	4,088	4,37
t17	4,871	5,21	4,871	5,21
t18	4,773	5,11	4,773	5,11
t19	4,375	4,68	4,375	4,68
t20	4	4,28	4	4,28
t21	3,6	3,85	3,6	3,85
t22	3	1,74	3	1,74
t23	2,8	1,62	2,8	1,62
t24	2,4	1,39	4,4	2,55
<b>Σ</b>		66,68		66,68

### 7.3. Scenarij 1 – dan u 1. mjesecu

Tokom zimskih dana, dani su kraći te je manje sunčevog zračenja zimi pa zbog toga i manja proizvodnja naspram ljetnih dana. Ta činjenica se može primijetiti usporedbom tablica 7.5. i 7.6.



**Slika 7.12.** Punjenje električnog automobila snagom Pcha1 i Pcha2 za period nekorištenja od 10 h do 16 h



**Slika 7.13.** Punjenje električnog automobila snagom Pcha1 i Pcha2 u periodu od 0 h do 24 h

Iz slike 7.12. je vidljivo da se koristila veća snaga punjenja baterijskog spremnika električnog automobila u jutarnjim satima, za vrijeme niske tarife. Vozilo je već u 6 h postiglo vrijednost stanja napunjenosti od 35,5 kWh i u 16 h se vratilo sa stanjem napunjenosti od 10 kWh.

Na slici 7.13. baterijski spremnik električnog automobila je sa većom snagom punjenja postiglo stanje napunjenosti u 4 h u iznosu od 33,6 kWh. Za vrijeme visoke tarife se nije koristilo punjenje, a nakraju večeri se koristila niža snaga punjenja kako bi postigla zadana vrijednost od 35,5 kWh.

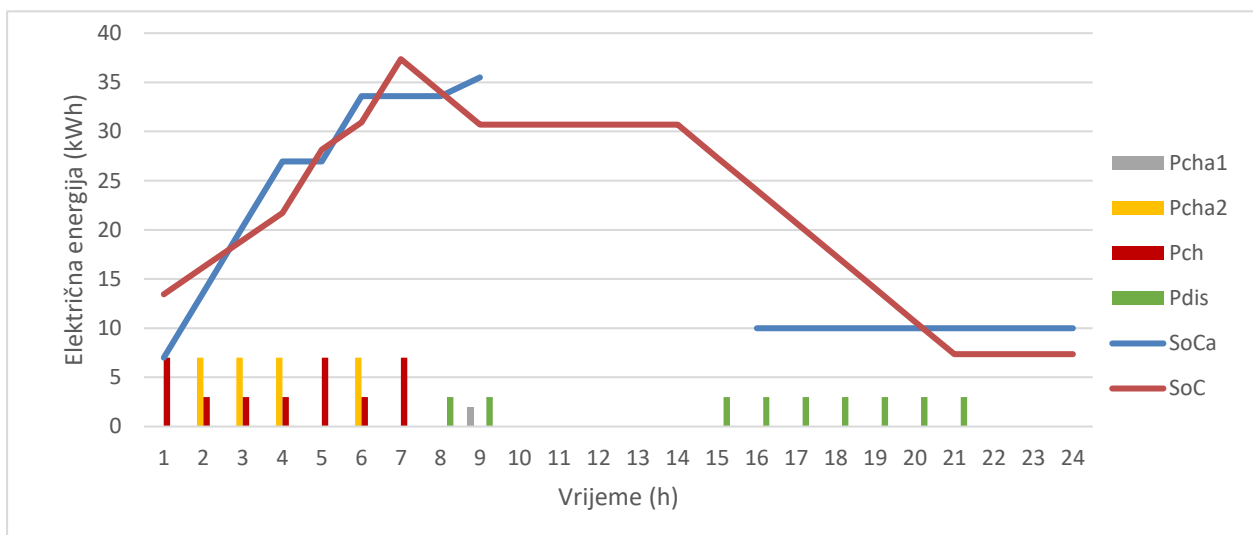
Prema tablici 7.8. se vidi da također kao i u slučaju za ljetni dan, nije došlo do uštede zbog nemogućnosti skladištenja električne energije.

**Tablica 7.8.** Kupljena električna energija i trošak kupljene električne energije za 1. scenarij – dan u 1. mjesecu

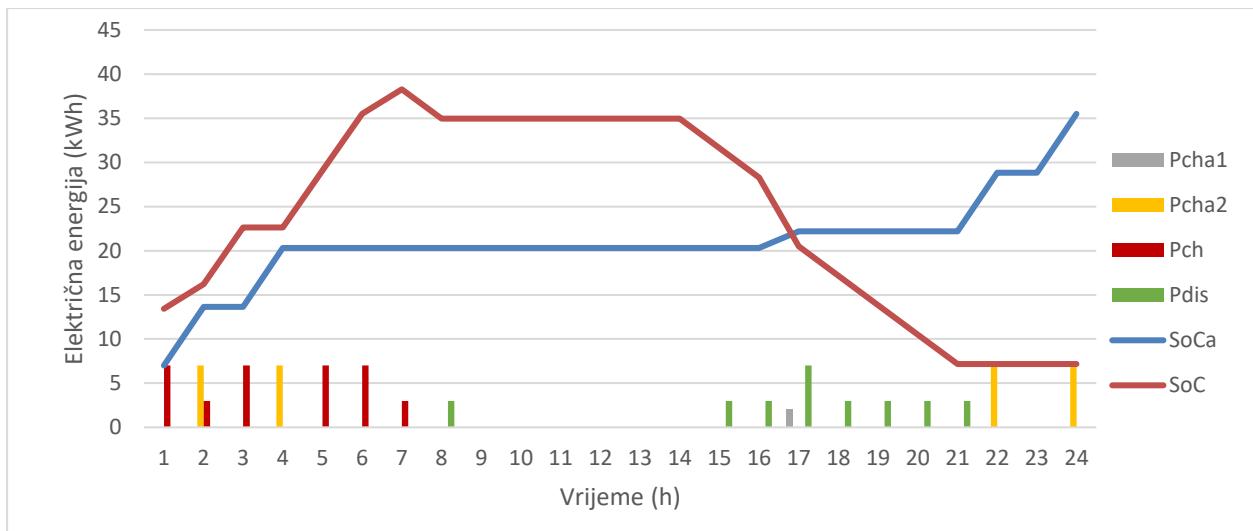
	Radni dan		Neradni dan	
	Kupljena energija iz mreže [kWh]	Trošak kupljene energije [kn]	Kupljena energija iz mreže [kWh]	Trošak kupljene energije [kn]
t1	9	5,22	9	5,22
t2	8,3	4,81	8,3	4,81
t3	7,7	4,47	7,7	4,47
t4	7,4	4,29	0,4	0,23
t5	0,9	0,52	2,9	1,68
t6	1,9	1,10	8,9	5,16
t7	2,694	2,88	2,694	2,88
t8	2,961	3,17	2,961	3,17
t9	2,457	2,63	2,457	2,63
t10	2,822	3,02	2,822	3,02
t11	4,182	4,48	4,182	4,48
t12	4,809	5,15	4,809	5,15
t13	5,573	5,96	5,573	5,96
t14	3,966	4,24	3,966	4,24
t15	3,407	3,65	3,407	3,65
t16	3	3,21	3	3,21
t17	3,5	3,75	3,5	3,75
t18	4,1	4,39	4,1	4,39
t19	4,1	4,39	4,1	4,39
t20	4	4,28	4	4,28
t21	3,3	1,91	3,3	1,91
t22	2,8	1,62	2,8	1,62
t23	2,5	1,45	2,5	1,45
$\Sigma$		83,08		83,08

## 7.4. Scenarij 2 – dan u 6. mjesecu

U drugom scenariju, kao i prvom scenariju, definirana su dva dana (radni i neradni dan) za odabrane dane u 6. i 1. te periodi punjenja električnog automobila unutar tih dana. Kućanstvo u ovom scenariju sadrži električni automobil, FN elektranu i stacionarni baterijski spremnik s diskretnim razinama snaga punjenja. Za punjenje stacionarnog baterijskog spremnika se koristi tri intervala punjenja gdje prva razina snage punjenja iznosi 3 kW, druga razina iznosi 7 kW, a treća razina iznosi 15 kW. Također se ove tri razine koriste i za pražnjenje stacionarnog baterijskog spremnika. Razine punjenja automobila ostaju nepromijenjene. Za sve razine punjenja stacionarnog baterijskog spremnika, proizvođač jamči korisnost punjenja od  $\eta = 92\%$ .



**Slika 7.14.** Punjenje električnog automobila snagom Pcha1 i Pcha2 za period nekorištenja od 10 h do 16 h, punjenje stacionarnog baterijskog spremnika snagom Pch i pražnjenje stacionarnog baterijskog spremnik snagom Pdis



**Slika 7.15.** Punjenje električnog automobila snagom Pcha1 i Pcha2 u periodu od 0 h do 24 h, punjenje stacionarnog baterijskog spremnika snagom Pch i pražnjenje stacionarnog baterijskog spremnik snagom Pdis

Prema slici 7.14. primjećuje se da na početku dana pri niskoj tarifi, baterijski spremnik električnog automobila se puni drugom razinom snage u cilju smanjenja troškova i ispunjenja zahtjeva za napunjenost. Stacionarni baterijski spremnik se punio na početku dana pri niskoj tarifi i različitim razinama snaga punjenja, a ostatak dana pri visokoj tarifi i zadovoljavanju potreba kućanstva za električnom energijom dolazi do pražnjenja.

Prema slici 7.15. punjenje baterijskog spremnika električnog automobila po niskoj tarifi sa drugom razinom snage se odvija u jutarnjim i večernjim satima. Na slici 7.13. i na slici 7.14, vidi se sličnost punjenja i pražnjenja stacionarnog baterijskog spremnika te da u oba slučaja je cilj postići što nižu prodaju električne energije u mrežu

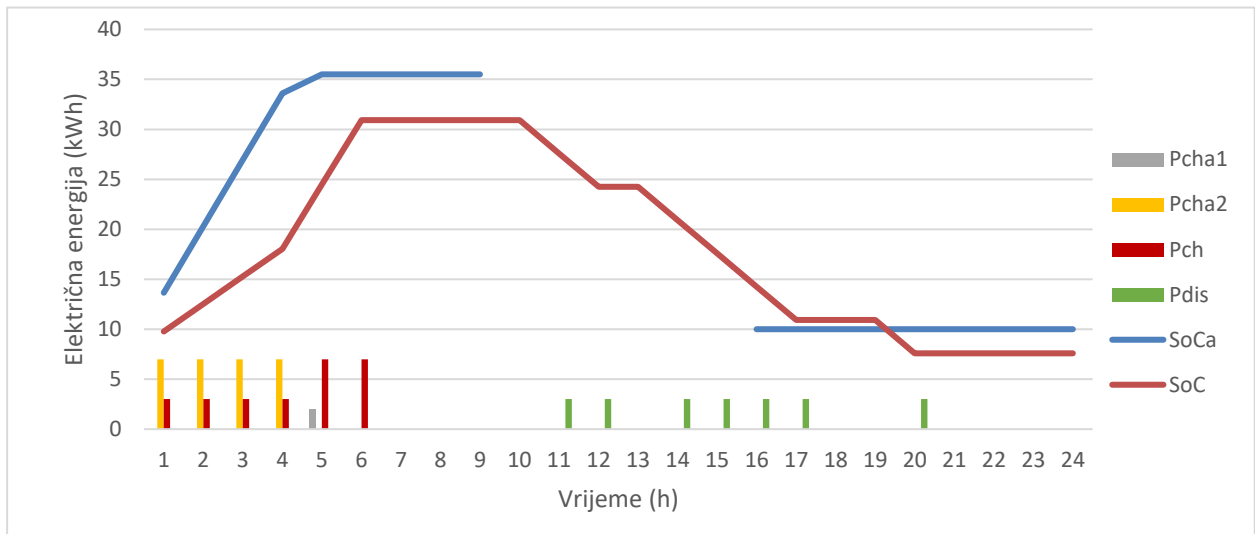
Uspoređujući tablice 7.7 i 7.9, vidljiva je veća ušteda tokom ljetnih dana zbog mogućnosti skladištenja električne energije u stacionarni baterijski spremnik, odnosno punjenja i pražnjenja stacionarnog baterijskog spremnika. Za period nekorištenja električnog automobila od 10 h do 16 h postignuta je ušteda od približno 12 % ili 8,14 kn po danu, a za period punjenja kroz cijeli dan je ušteda približno 13 % ili 8,54 kn po danu.



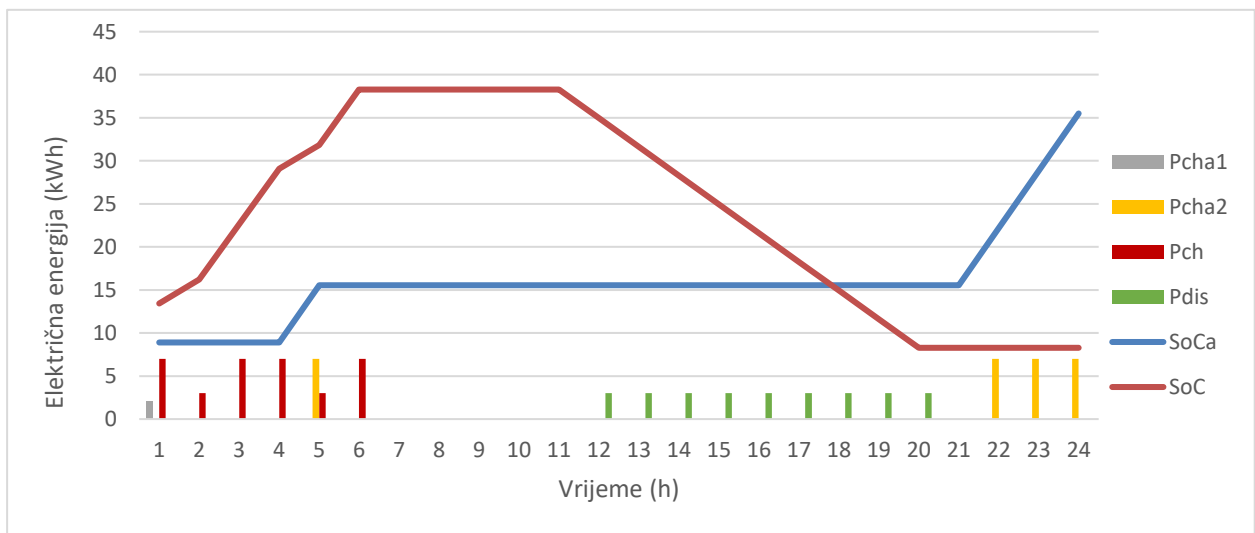
**Tablica 7.9.** Kupljena i prodana električna energija i trošak kupljene i prihod od prodane električne energije za 2. scenarij – dan u 6. mjesecu

	Radni dan				Neradni dan			
	Kupljena energija iz mreže [kWh]	Prodana energija u mrežu [kWh]	Trošak kupljene energije [kn]	Prihod od prodane energije [kn]	Kupljena energija iz mreže [kWh]	Prodana energija u mrežu [kWh]	Trošak kupljene energije [kn]	Prihod prodane energije [kn]
t1	9,1		5,28		9,1		5,28	
t2	12		6,96		12		6,96	
t3	11,5		6,67		8,5		4,93	
t4	11,3		6,55		8,3		4,81	
t5	8,560		4,96		8,560		4,96	
t6	11,770		6,83		8,770		5,09	
t7	9,243		5,36		5,243		3,04	
t8		0,837		0,28		0,837		0,28
t9	0,053		0,06		1,053		1,13	
t10	0,090		0,10		0,090		0,10	
t11	0,192		0,21		0,192		0,21	
t12	0,095		0,10		0,095		0,10	
t13	1,263		1,35		1,263		1,35	
t14	1,298		1,39		1,298		1,39	
t15		0,008		0,00		0,008		0,00
t16	1,088		1,16		1,088		1,16	
t17	1,871		2,00			0,129		0,04
t18	1,773		1,90		1,773		1,90	
t19	1,375		1,47		1,375		1,47	
t20	1		1,07		1		1,07	
t21	0,6		0,64		0,6		0,64	
t22	3		1,74		10		5,80	
t23	2,8		1,62		2,8		1,62	
t24	2,4		1,39		9,4		5,45	
<b>Σ</b>			<b>58,54</b>				<b>58,14</b>	

## 7.5. Scenarij 2 – dan u 1. mjesecu



**Slika 7.16.** Punjenje električnog automobila snagom Pcha1 i Pcha2 za period nekorisćenja od 10 h do 16 h, punjenje stacionarnog baterijskog spremnika snagom Pch i pražnjenje stacionarnog baterijskog spremnik snagom Pdis



**Slika 7.17.** Punjenje električnog automobila snagom Pcha1 i Pcha2 u periodu od 0 h do 24 h, punjenje stacionarnog baterijskog spremnika snagom Pch i pražnjenje stacionarnog baterijskog spremnik snagom Pdis

**Tablica 7.10.** Kupljena električna energija i trošak električne energije za 2. scenarij – dan u 1. mjesecu

	Radni dan		Neradni dan	
	Kupljena energija iz mreže [kWh]	Trošak kupljene energije [kn]	Kupljena energija iz mreže [kWh]	Trošak kupljene energije [kn]
t1	12	6,96	11	6,38
t2	11,3	6,55	4,3	2,49
t3	10,7	6,21	7,7	4,47
t4	10,4	6,03	7,4	4,29
t5	9,9	5,74	10,9	6,32
t6	8,9	5,16	8,9	5,16
t7	2,694	2,88	2,694	2,88
t8	2,961	3,17	2,961	3,17
t9	2,457	2,63	2,457	2,63
t10	2,822	3,02	2,822	3,02
t11	1,182	1,27	4,182	4,48
t12	1,809	1,94	1,809	1,94
t13	5,573	5,96	2,573	2,75
t14	0,966	1,03	0,966	1,03
t15	0,407	0,44	0,407	0,44
t16				
t17	0,5	0,54	0,5	0,54
t18	4,1	4,39	1,1	1,18
t19	4,1	4,39	1,1	1,18
t20	1	1,07	1	1,07
t21	3,3	1,91	3,3	1,91
t22	2,8	1,62	9,8	5,68
t23	2,5	1,45	9,5	5,51
t24	2,3	1,33	9,3	5,39
$\Sigma$		75,69		73,91

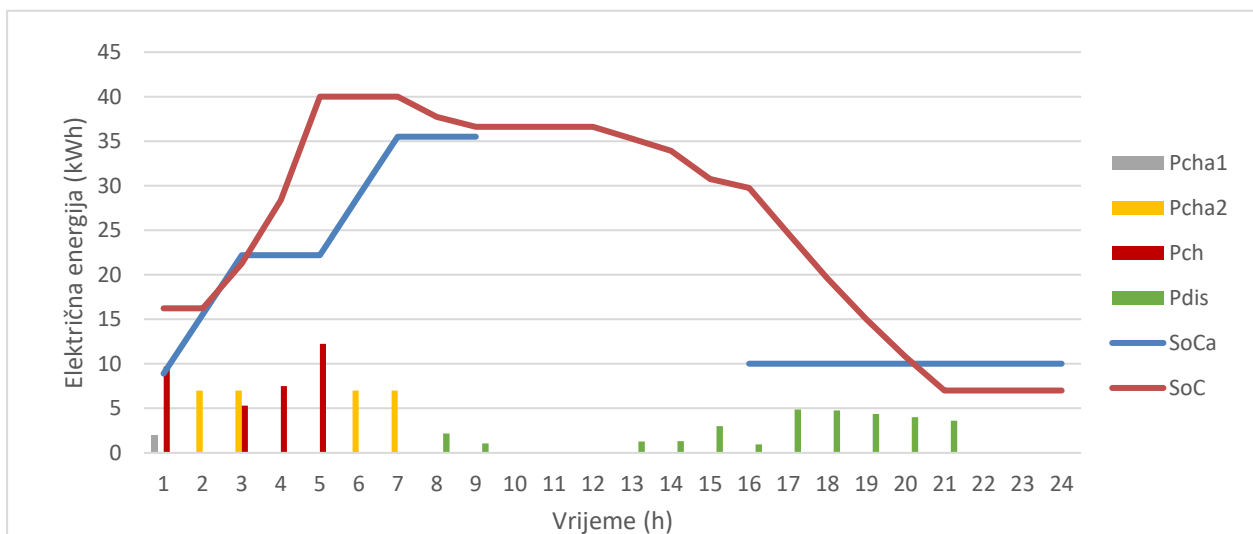
Gledajući sliku 7.16. može se vidjeti kako u jutarnjim satima u periodu nekorištenja električnog automobila od 10 h do 16 h se koristi veća razina snage punjenja električnog automobila te se u 5 h postigla zadana vrijednost stanja napunjenosti električnog automobila od 35,5 kWh.

Dok za period punjenja kroz cijeli dan u jutarnjim satima se koristila manja razina snage punjenja električnog automobila u kombinaciji s višom razinom snage, prema slici 7.17. Za vrijeme visoke tarife se stanje napunjenosti baterijskog spremnika električnog automobila održava na vrijednosti od 15,5 kWh, a na kraju dana se puni većom razinom snage punjenja kako bi postigla zadanu vrijednost od 35,5 kWh.

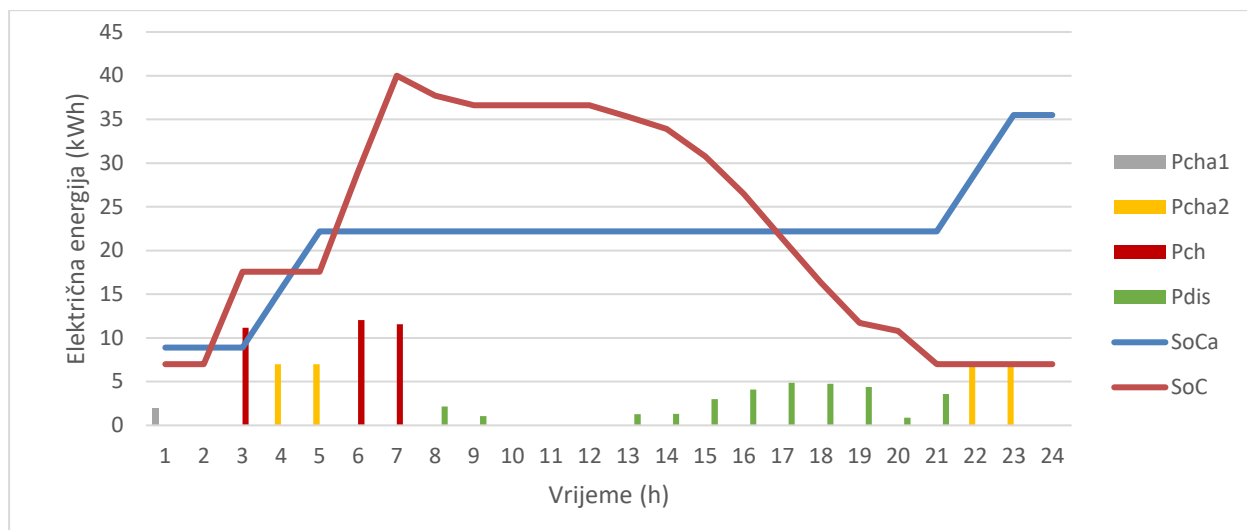
Uspoređujući tablice 7.8. i 7.10., vidljiva je veća ušteda tokom zimskih dana zbog mogućnosti skladištenja električne energije u stacionarni baterijski spremnik, odnosno punjenja i pražnjenja stacionarnog baterijskog spremnika. Za period nekorištenja električnog automobila od 10 h do 16 h omogućena je ušteda koja iznosi približno 9 % ili 7,39 kn po danu, a za period punjenja kroz cijeli dan je ušteda približno 11 % ili 9,17 kn po danu.

## 7.6. Scenarij 3 – dan u 6. mjesecu

U trećem scenariju, kao i u prvom i u drugom scenariju, definirana su dva dana (radni i neradni dan) za odabrane dane u 6. i 1. mjesecu te periodi punjenja električnog automobila unutar tih dana. Za razliku od drugog scenarija, u ovom scenariju se za stacionarni baterijski spremnik koristi kontinuirano punjenje što znači da nema definirane razine snage punjenja osim maksimalne koja iznosi 15 kW, već u svakom satu se koristi optimalna snaga za punjenje.



**Slika 7.18.** Punjenje električnog automobila snagom Pcha1 i Pcha2 za period nekorištenja od 10 h do 16 h, punjenje stacionarnog baterijskog spremnika snagom Pch i pražnjenje stacionarnog baterijskog spremnik snagom Pdis



**Slika 7.19.** Punjenje električnog automobila snagom Pcha1 i Pcha2 u periodu od 0 h do 24 h, punjenje stacionarnog baterijskog spremnika snagom Pch i pražnjenje stacionarnog baterijskog spremnik snagom Pdis

Sa slike 7.18. može se istaknuti da se stacionarni baterijski spremnik puni pri velikim snaga u jutarnjim satima kada potražnja nije velika i pri niskoj tarifi, a i dok proizvodnja električne energije nije prisutna. Također je vidljivo i s baterijskim spremnikom automobila koji se punio u jutarnjim satima s većom snagom punjenja dok još nije počelo vrijeme visoke tarife. Za vrijeme visoke tarife, kućanstvo nije imalo veću potrebu za energiju iz mreže budući da je u tom vremenu proizvodnja FN elektrane bila visoka, to se također može primijetiti iz tablice 7.10., gdje cijena kupljene električne energije u pojedinim satima iznosi 0 kn.

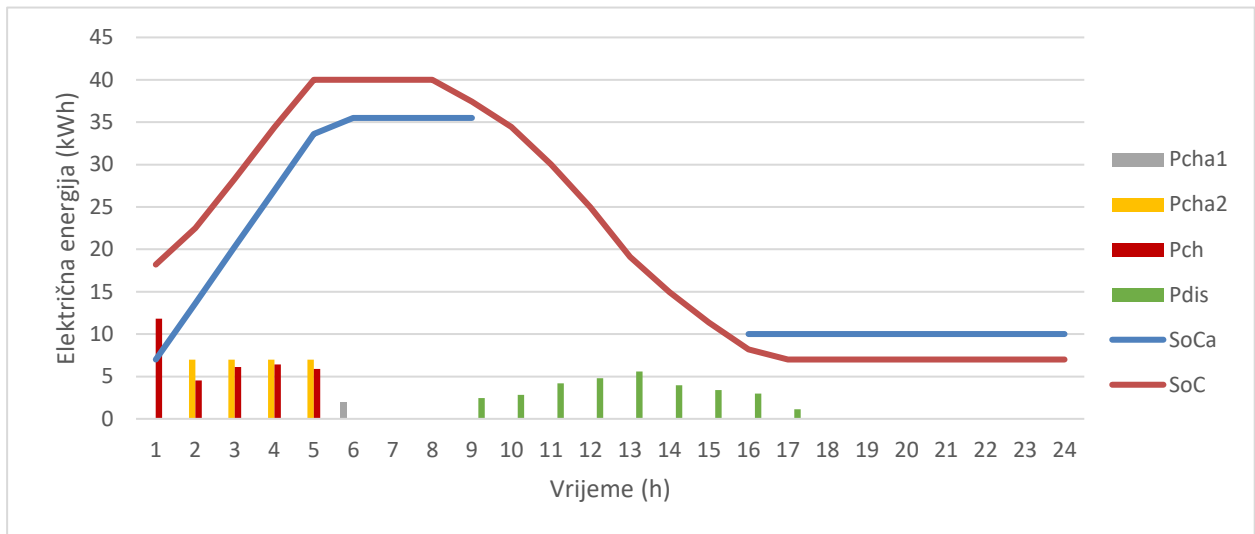
Stacionarni baterijski spremnik se prema slici 7.19. punio velikim snagama u jutarnjim satima za vrijeme niske tarife, dok za vrijeme visoke tarife osigurava potrebnu električnu energiju kućanstva pražnjenjem.

Usporedbom tablice 7.9. i tablice 7.11., za vrijeme perioda nekorištenja električnog automobila od 10 h do 16 h, vidljiva je ušteda u iznosu od približno 9 % ili 5,15 kn po danu. Gledajući periode punjenja kroz cijeli dan se primijeti ušteda za približno 8 % ili 4,85kn po danu. U trećem scenariju nije bilo potrebe za povlačenje energije iz mreže kao što je bilo u drugom scenariju. Može se zaključiti da primjenom kontinuiranog načina punjenja i pražnjenja stacionarnog baterijskog spremnika su postignute najveće uštede kućanstva, jer nije došlo do prodaje električne energije u mrežu po znatno nižoj cijeni od kupovne.

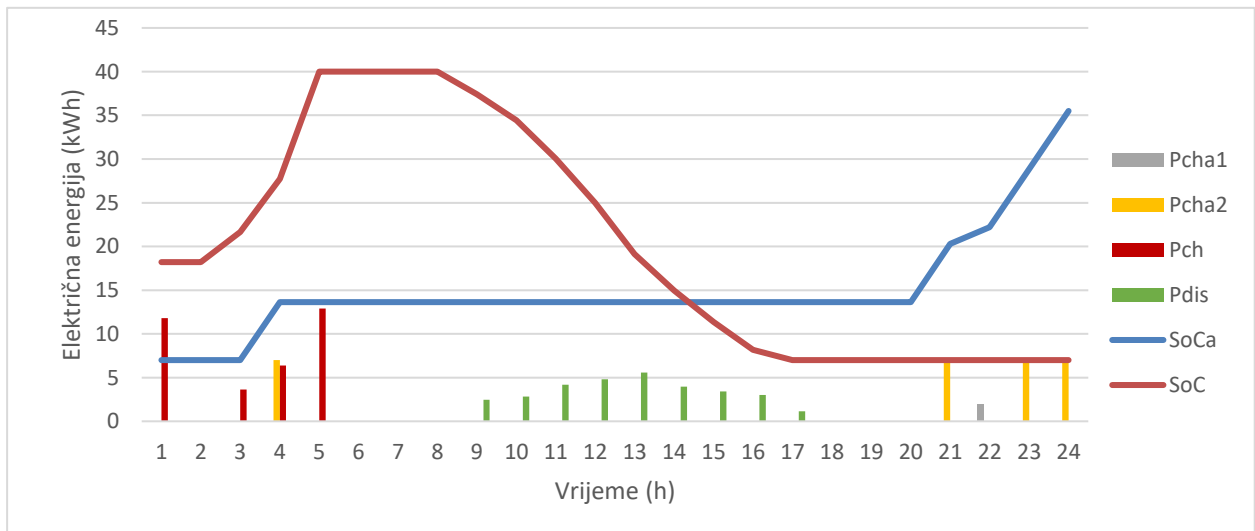
**Tablica 7.11.** Kupljena električna energija i trošak kupljene električne energije za 3. scenarij – dan u 6. mjesecu

	Radni dan		Neradni dan	
	Kupljena energija iz mreže [kWh]	Trošak kupljene energije [kn]	Kupljena energija iz mreže [kWh]	Trošak kupljene energije [kn]
t1	13,8	8,00	4,1	2,38
t2	9	5,22	2	1,16
t3	13,8	8,00	12,650	7,34
t4	8,797	5,10	8,3	4,81
t5	13,8	8,00	8,560	4,96
t6	8,770	5,09	13,8	8,00
t7	9,243	5,36	13,8	8,00
t8				
t9				
t10	0,090	0,10	0,090	0,10
t11	0,1917	0,21	0,192	0,21
t12	0,095	0,10	0,095	0,10
t13				
t14				
t15				
t16	3,126	3,35		
t17				
t18				
t19				
t20			3,126	3,35
t21				
t22	3	1,74	10	5,80
t23	2,8	1,62	9,8	5,68
t24	2,4	1,39	2,4	1,39
$\Sigma$		53,29		53,29

## 7.7. Scenarij 3 – dan u 1. mjesecu



**Slika 7.20.** Punjenje električnog automobila snagom Pcha1 i Pcha2 za period nekorisćenja od 10 h do 16 h, punjenje stacionarnog baterijskog spremnika snagom Pch i pražnjenje stacionarnog baterijskog spremnik snagom Pdis



**Slika 7.21.** Punjenje električnog automobila snagom Pcha1 i Pcha2 u periodu od 0 h do 24 h, punjenje stacionarnog baterijskog spremnika snagom Pch i pražnjenje stacionarnog baterijskog spremnik snagom Pdis

**Tablica 7.12.** Kupljena električna energija i trošak kupljene električne energije za 3. scenarij – dan u 1. mjesecu

	Radni dan		Neradni dan	
	Kupljena energija iz mreže [kWh]	Trošak kupljene energije [kn]	Kupljena energija iz mreže [kWh]	Trošak kupljene energije [kn]
t1	13,8	8,00	13,8	8,00
t2	12,837	7,45	1,3	0,75
t3	13,8	8,00	4,337	2,52
t4	13,8	8,00	13,8	8,00
t5	13,8	8,00	13,8	8,00
t6	3,9	2,26	1,9	1,10
t7	2,694	2,88	2,694	2,88
t8	2,961	3,17	2,961	3,17
t9				
t10				
t11				
t12				
t13				
t14				
t15				
t16				
t17	2,368	2,53	2,368	2,53
t18	4,1	4,39	4,1	4,39
t19	4,1	4,39	4,1	4,39
t20	4	4,28	4	4,28
t21	3,3	1,91	10,3	5,97
t22	2,8	1,62	4,8	2,78
t23	2,5	1,45	9,5	5,51
t24	2,3	1,33	9,3	5,39
$\Sigma$		69,68		69,68

Uz kontinuirano punjenje u trećem scenariju, prema tablici 7.12. u usporedbi s tablicom 7.10., istaknuta je ušteda u iznosu od približno 8 % ili 6,01 kn po danu gledajući period nekorištenja električnog automobila između 10 h i 16 h. U periodu punjenja električnog automobila kroz cijeli dan, došlo je do uštede od približno 6 % ili 4,23 kn po danu.

Za većinu vremena visoke tarife se nije povlačila energija iz mreže tj. dolazilo je do pražnjenja stacionarnog baterijskog spremnika. Gledajući sva tri scenarija, ovo je najbolji scenarij u kojem je došlo do najveće uštede.



## ZAKLJUČAK

Ovaj diplomski rad, nakon izvršene simulacije u programskom jeziku GAMS, prikazuje ponašanje baterijskog spremnika električnog automobila prema zadanim uvjetima korištenja električnog automobila za punjenje i stacionarnog baterijskog spremnika. U simulaciji su uključene cijene visoke i niske tarife koje su definirane za zimsko i ljetno godišnje doba koje također igraju ulogu pri optimizaciji.

Rad sadrži tri scenarija, gdje se u prvom scenariju koristi električni automobil s dvije razine snage punjenja i fotonaponska elektrana. Scenarij koji je podijeljen na dan u 6. mjesecu i na dan u 1. mjesecu sadrži različitu proizvodnju električne energije i različitu potražnju. Odabrani dani su podijeljeni na temelju dostupnosti punjenja električnog automobila. Budući da prvi scenarij nema mogućnost pohrane električne energije, pokazalo se prema tablicama 7.7. i 7.8. da nema uštede u oba navedena slučaja.

Drugi scenarij se sastoji od električnog automobila s dvije razine punjenja, fotonaponske elektrane i stacionarnog baterijskog spremnika koji se diskretno puni i prazni s tri razine snage (tri intervala). Po rezultatima simulacije drugog scenarija primjećuje se ušteda u odnosu na prvi scenarij, a razlog toga je mogućnost pohrane električne energije i boljeg raspolaganja električnome energijom. Za dan u 6. mjesecu, ovaj scenarij donosi uštedu od 8,14 kn, a za dan u 1. mjesecu donosi uštedu od 7,39 kn.

Treći scenarij je napravljen po uzoru prvog i drugog scenarija, ali za razliku od drugog scenarija, u ovom scenariju se za stacionarni baterijski spremnik koristi kontinuirana razina snage punjenja. Kontinuirano punjenje predstavlja optimalno punjenje stacionarnog baterijskog spremnika za svaki sat. Ovaj treći scenarij je pokazatelj optimalnog modela u odnosu na prva dva scenarija, gdje u usporedbi s drugim modelom ovaj scenarij za dan u 6. mjesecu donosi uštedu od 5,29 kn, a za dan u 1. mjesecu donosi uštedu od 6,01 kn.

## SAŽETAK

U uvodnom dijelu rada je opisan zadatak diplomskog rada. Cilj diplomskog rada je napraviti optimizacijski model s ciljem minimizacije ukupnih troškova za potrošenu električnu energiju za primjer kućanstva koji posjeduje stacionarni baterijski spremnik, fotonaponsku elektranu i električno vozilo. Napravljena je teorijska podloga o fotonaponskim elektranama te o njihovim podjelama. Opisane su osnove baterijskih spremnika i načini pohrane u njima. Također su opisana električna vozila koja se danas koriste te koji se priključci punjenja koriste u svijetu. Razrađen je matematički model s funkcijom cilja za minimizaciju troškova za navedeni primjer kućanstva te u sedmom poglavlju su prikazani rezultati modela koji su primijenjeni na tri različita scenarija. Dani su komentari za svaki scenarij i za usporedbe među scenarijima.

Ključne riječi: električna energija, fotonaponska elektrana, stacionarni baterijski spremnik, baterijski spremnik, električno vozilo, optimizacija tržišta

## **ABSTRACT**

The introductory part of the paper describes the task of the diploma thesis. The aim of the thesis is to create an optimization model with the aim of minimizing the total cost of electricity consumed for the example of a household that has a stationary battery tank, a photovoltaic power plant and an electric vehicle. A theoretical basis for photovoltaic power plants and their divisions has been made. The basics of battery containers and methods of storage in them are described. It also describes the electric vehicles used today and which charging connectors are used in the world. A mathematical model with a goal function to minimize costs for the given household example was developed, and in the seventh chapter are the results of the model applied to three different scenarios. Comments are given for each scenario and for comparisons between the scenarios.

Keywords: electricity, photovoltaic power plant, stationary battery tank, battery tank, electric vehicle, market optimization

## LITERATURA

- [1] „SOLE solarni paneli“ [online], SolarShop, dostupno na: <https://www.solarno.hr/katalog/proizvod/Paneli/vrste-solarnih-panela-mono-poly-asi> [Preuzeto: 6.9.2021.]
- [2] „Vrste fotonaponskih panela i učinkovitost“, Solarne elektrane, 2019., dostupno na: <https://www.solarne-elektrane.hr/vrste-fn-panela-i-ucinkovitost-2/> [Preuzeto: 6.9.2021.]
- [3] „Fotonaponski sustavi“, EKO-SUSTAV, 2020., dostupno na: <https://eko-sustav.hr/strucni-clanci/fotonaponski-sustavi/> [Preuzeto: 6.9.2021.]
- [4] Lj. Majdandžić, Fotonaponski sustavi, Priručnik, Tehnička škola Ruđera Boškovića, Zagreb
- [5] A. Čotar, A. Filčić, Fotonaponski sustavi, Rijeka, 2012., dostupno na: [https://www.irena-istra.hr/uploads/media/Fotonaponski\\_sustavi.pdf](https://www.irena-istra.hr/uploads/media/Fotonaponski_sustavi.pdf) [Preuzeto: 15.9.2021.]
- [6] D. Kosić, „Sustavi pohrane električne energije“, Osijek, 2016.
- [7] T. P. Zora Luburić, Hrvoje Bašić, Hrvoje Pandžić, „12. simpozij o sustavu vođenja EES-a The role of Energy Storage in Smart Grids,” no. Studeni, Split, pp. 1–10, 2016.
- [8] V. Stanković, „Spremnici električne energije u mikromrežama“, Osijek, 2017.
- [9] D. Linden, T.B.Reedy, „HANDBOOK OF BATTERIES”, 2002.
- [10] M. Murnane, A. Ghazel, “A Closer Look at State of Charge (SOC) and State of Health (SOH) Estimation Techniques for Batteries.”
- [11] „State of Charge (SoC) Determination“, Electropaedia, dostupno na: <https://www.mpoweruk.com/> [Preuzeto: 8.9.2021.]
- [12] M. Maligec, „Planiranje rada stacionarnog spremnika energije u sustavu s fotonaponskim elektranama“, Osijek, 2020.
- [13] Wallbox, „Copper SB“, dostupno na: [https://wallbox.com/en\\_catalog/](https://wallbox.com/en_catalog/) [Preuzeto: 9.9.2021.]

- [14] T. Ćurković, „Learning E-Mobility“, Zagreb, 2017.
- [15] Volkswagen, dostupno na: <https://www.volkswagen.hr/elektricna-vozila/punjenje-i-doseg/gdje-mogu-puniti-vozilo> [Preuzeto: 9.9.2021.]
- [16] „SAE J1772 Compliant Electric Vehicle Connector“, Electric Vehicles News, dostupno na: [https://www.electricvehiclesnews.com/Footer/Technology/SAE\\_J1772.html](https://www.electricvehiclesnews.com/Footer/Technology/SAE_J1772.html) [Preuzeto: 11.9.2021.]
- [17] „Plug wars: Which plug will your EV use?“, B. Grayto, Renew., 2017., dostupno na: <https://renew.org.au/renew-magazine/electric-vehicles/plug-wars-which-plug-will-your-ev-use/> [Preuzeto: 11.9.2021.]
- [18] Evchargeking, „How it works“, dostupno na: [Preuzeto: 11.9.2021.]
- [19] Chademo Association, „Connectors“, dostupno na: [www.chademo.com](http://www.chademo.com) [Preuzeto: 11.9.2021.]
- [20] „Electric Truck charging options Broadened in North America through Volvo Lights Project“, Telematics Wire, 2020., dostupno na: <https://www.telematicswire.net/electric-truck-charging-options-broadened-in-north-america-through-volvo-lights-project/> [Preuzeto: 12.9.2021.]
- [21] TESLA, „Adapter CCS Combo 2“, dostupno na: [https://www.tesla.com/hr\\_HR/support/charging-connectors](https://www.tesla.com/hr_HR/support/charging-connectors) [Preuzeto: 12.9.2021.]
- [22] Electric Vehicle Database, dostupno na: <https://ev-database.org/car/1239/Hyundai-Kona-Electric-39-kWh> [Preuzeto: 13.9.2021.]
- [23] Sministros del Sol, „Lithium Battery Freedom Lite 40 kWh“, dostupno na: <https://suministrosdelsol.com/en/freedom-lite-lithium-battery/413-lithium-battery-freedom-40kwh.html> [Preuzeto: 13.9.2021.]
- [24] International Energy Agency (IEA) – Tracking transport, <https://www.iea.org/reports/tracking-transport-2020>, [Preuzeto: 20.8.2021]
- [25] Ministarstvo graditeljstva i prostornoga uređenja RH: Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, 2015.

- [26] Mehrabi, A., Kim, K.: Low-Complexity Charging/Discharging Scheduling for Electric Vehicles at Home and Common Lots for Smart Households Prosumers. *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 65 (3), 348–355 (2018). doi: 10.1109/TCE.2018.2864548 16
- [27] Giordano, F., Ciocia, A., Di Leo, P., Mazza, A., Spertino, F., Tenconi, A., Vaschetto, S.: Vehicle-to-Home Usage Scenarios for Self-Consumption Improvement of a Residential Prosumer With Photovoltaic Roof. *IEEE transactions on industry applications* 56 (3), 2945– 2956 (2020). doi: 10.1109/TIA.2020.2978047
- [28] Hou, X., Wang, J., Huang, T., Wang, T., Wang, P.: Smart Home Energy Management Optimization Method Considering Energy Storage and Electric Vehicle. *IEEE Access* 7, 144010–144020 (2019). doi: 10.1109/ACCESS.2019.2944878

## **ŽIVOTOPIS**

Nikša Radić rođen je 21.12.1996. godine u Osijeku. Pohađao je osnovnu školu Jagode Truhelke u Osijeku te nakon završetka upisao je Graditeljsko-Geodetsku školu Osijek, smjer arhitekt. Nakon završetka srednje škole i položene državne mature upisao je preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku (sada pod nazivom "Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija) te na drugoj godini odabrao smjer elektroenergetika. Nakon završetka preddiplomskog studija elektrotehnike upisuje Diplomski studij elektrotehnika, smjer Elektroenergetika, izborni blok Održiva elektroenergetika.