

# Sustavi pohrane električne energije

---

**Kosić, Daniel**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2016**

*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:200:946311>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-23**

*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**

**SUSTAVI POHRANE ELEKTRIČNE ENERGIJE**

**Diplomski rad**

**Daniel Kosić**

**Osijek, 2016.**

## Sadržaj

1	UVOD .....	1
2	POTREBA ZA POHRANOM ELEKTRIČNE ENERGIJE .....	2
3	SUSTAVI POHRANE ELEKTRIČNE ENERGIJE .....	4
3.1	Mehanički sustavi za pohranu električne energije.....	4
3.1.1	Crpno-akumulacijske hidroelektrane.....	4
3.1.2	Pehrana energije komprimiranim zrakom .....	6
3.1.3	Pehrana energije pomoću zamašnjaka.....	7
3.2	Elektrokemijski sustavi pohrane električne energije .....	9
3.2.1	Olovno-kiselinska baterija (LA).....	9
3.2.2	Nikal-kadmij i nikal-metal hibrid baterije (NiCd, NiMH) .....	10
3.2.3	Litij-ionske baterije (Li-ion).....	10
3.2.4	Metal-zrak baterije (Me-air).....	12
3.2.5	Natrij-sumpor baterije (NaS).....	12
3.2.6	Natrij nikal klorid baterije (NaNiCl) .....	13
3.2.7	Redoks protočna baterija (RFB).....	14
3.2.8	Hibrid protočna baterija (HFB) .....	15
3.3	Kemijski sustavi pohrane električne energije.....	15
3.3.1	Vodik (H <sub>2</sub> ) .....	16
3.3.2	Sintetički prirodni plin (SNG) .....	17
3.4	Električni sustavi pohrane električne energije.....	19
3.4.1	Ultra kondenzator (DCL) .....	19
3.4.2	Supravodljivi magnetski svitak (SMES) .....	20
3.5	Termički sustavi za pohranu električne energije .....	22
3.5.1	Pehrana topline.....	22
4	PODRUČJA PRIMJENE POJEDINIH TEHNOLOGIJA ZA POHRANU ELEKTRIČNE ENERGIJE .....	25
4.1	Izravna usporedba.....	29
4.2	Primjeri pohrane električne energije .....	30
4.2.1	Primjer 1 .....	30
4.2.2	Primjer 2 .....	32
4.2.3	Primjer 3 .....	32
5	OPTIMIZIACIJA SAMOSTALNOG FOTONAPONSKOG SUSTAVA S POHRANOM ELEKTRIČNE ENERGIJE.....	34
5.1	Opis modela.....	36
5.1.1	Opterećenje.....	36

5.1.2	Proizvodnja.....	37
5.1.3	Fotonaponski modul.....	41
5.2	Opis optimizacije.....	44
5.2.1	Blok dijagram.....	46
5.3	Rezultati.....	48
6	ZAKLJUČAK.....	54
6.1	LITERATURA.....	55
6.2	SAŽETAK.....	56
6.3	ABSTRACT.....	56
6.4	ŽIVOTOPIS.....	57
6.5	POPIS SLIKA I TABLICA.....	58
6.6	PRILOZI.....	60

# 1 UVOD

U ovom radu opisan će se načini pohrane električne energije te optimizacija samostalnog fotonaponskog sustava s pohranom. U drugom poglavlju rada će se opisati potreba za pohranom električne energije, važnost pohrane te kooperacija obnovljivih izvora i pohrane energije. Treće poglavlje opisuje različite načine pohrane električne energije, njihov princip rada te njihove nedostatke i prednosti. Detaljno opisuje glavne karakteristike mehaničkih, elektrokemijskih, kemijskih, električnih i toplinskih sustava za pohranu energije. U četvrtom poglavlju rada opisan će se područja primjene pojedinih tehnologija za pohranu električne energije. Također, opisan će se njihova izravna usporedba i nekoliko stvarnih primjera. U petom poglavlju prikazan će se optimizacija samostalnog fotonaponskog sustava sa pohranom električne energije. Opisat će se cijeli model: opterećenje, proizvodnja, modul i baterija. Detaljno će se opisati način optimizacije. Prikazan će se rezultat za područje grada Osijeka kroz jedan dan, tjedan i godinu. U šestom poglavlju prikazan je zaključak diplomskog rada.

## 2 POTREBA ZA POHRANOM ELEKTRIČNE ENERGIJE

Današnji svijet je na prekretnici. Zagađenje je u porastu, ponestaje resursa te se klima mijenja. Budući da se procjenjuje da će fosilnih goriva nestati u sljedećih nekoliko desetljeća [1], u interesu nam je da pronađemo zamjenu na dugoročnoj osnovi. Moderna tehnologija nam već pruža takve alternative kao što su vjetroturbine, fotonaponske ćelije, postrojenja na biomasu i još mnogo toga. No, ove tehnologije imaju nedostatke. U usporedbi s tradicionalnim elektranama proizvode mnogo manje količine električne energije pa čak i veći problem je neravnomjernost proizvodnje. Globalna potražnja za električnom energijom je ogromna i raste za oko 3,6 posto na godišnjoj razini [1]. Iz tehničkih razloga količina električne energije koja se ispušta u mrežu mora uvijek biti jednaka količini koja se zahtijeva od strane potrošača kako bi se spriječili ispadi i oštećenja mreže. To dovodi do situacije da je proizvodnja veća od potrošnje i obrnuto. Tu tehnologije za pohranu dolaze u igru – one su ključni element u ravnoteži tih nedostataka.

Uz rastuću važnost obnovljivih izvora energije, znanstvenici i inženjerisu zabrinuti kako poboljšati učinkovitost i smanjiti troškove tih tehnologija. Ipak, čini se da postoji samo šačica dostupne tehnologije koja je dovoljno djelotvorna i ekonomična. Kao što većina nas zna, pohrana energije nije jednostavan zadatak. Baterija na pametnom telefonu traje samo otprilike jedan dan, baterija laptopa traje samo nekoliko sati, raspon za električne automobile je ograničen na samo nešto više od 100 kilometara, a to su samo primjeri za relativno male uređaje. Sada treba zamisliti problem skladištenja energije na razini nekoliko stotina do tisuća vjetroturbina i fotonaponskih ćelija.

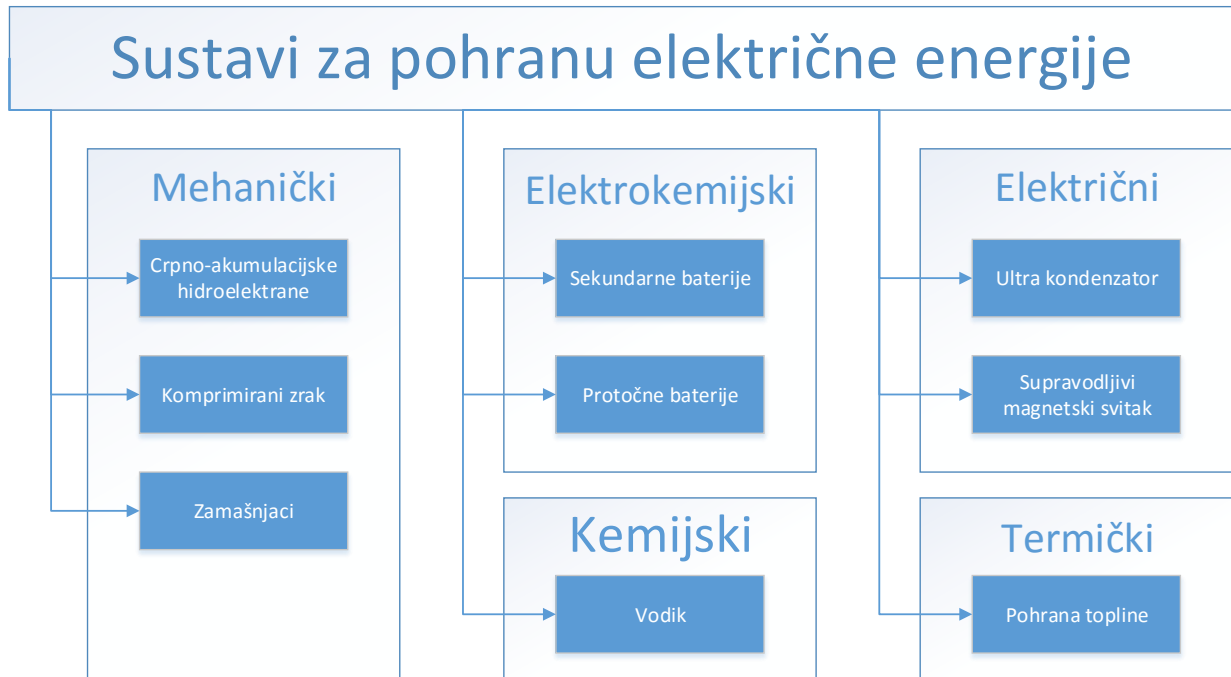
Kako ponestaje nafte potrebno je zamijeniti konvencionalne elektrane elektranama na obnovljive izvore energije. Proizvodnju elektrana iz obnovljivih izvora energije teško je predvidjeti. Možda smo u mogućnosti predvidjeti vrijeme u sljedećih nekoliko dana, ali kao što svi znamo, prognoza nije uvijek u pravu, ali čak i da jest, nekoliko dana nije dovoljno za izračun stanja nacionalne električne mreže kako bi se osigurala sigurna opskrba energijom. Također, kad vjetar stane, on stane, predviđanje neće promijeniti činjenicu da vjetroturbine neće proizvoditi energiju koja nam je potrebna. Dakle, potrebno je naći način da se kompenzira to kolebanje proizvodnje, spremiti energiju u vrijeme sunčanih i vjetrovitih dana i koristiti ga za vrijeme oblačnih dana i dana bez vjetra. Tehnologije za to postoje, čak se i koriste danas, ali njihov kapacitet nije ni blizu dovoljan – ne ako planiramo ići zeleno i održivo. Problem je u tome da nije moguće jednostavno izgraditi više postojećih tehnologija za pohranu jer svaka tehnologija ima svoje nedostatke. Naprimjer, crpno-akumulacijska hidroelektrana, najpouzdanija i za sada jedina ekonomična dostupna

tehnologija pohrane, vrlo je ograničena na nekoliko potencijalnih lokacija i strogim zakonima o zaštiti prirode.

Modernizacija električnog sustava pomoći će pri izazovu rješavanja energetske potrebe, uključujući rješavanje problema klimatskih promjena integrirajući više energije iz obnovljivih izvora i povećanje učinkovitosti u procesima proizvodnje energije iz neobnovljivih izvora. Sustav za isporuku električne energije mora ostati snažan i elastičan pa tako pohrana energije može igrati značajnu ulogu u ispunjavanju tih izazova kroz poboljšanje operativne sposobnosti mreže, smanjenje troškova i osiguravanje visoke pouzdanosti, kao i odgađanje i smanjenje ulaganja u infrastrukturu [2]. Skladištenje energije može biti korisno i za stanje pripravnosti u hitnim slučajevima zbog svoje sposobnosti da pruži rezervnu snagu, kao i zbog sposobnosti stabilizacije.

### 3 SUSTAVI POHRANE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Često primjenjivi pristup razvrstavanja sustava za pohranu električne energije je razvrstavanje prema obliku energije koja se koristi. Sustavi za pohranu električne energije mogu se svrstati u mehaničke, elektrokemijske, kemijske, električne i termalne sustave, što je prikazano na slici 3.1.



**Slika 3.1** Podjela sustava za pohranu električne energije prema obliku energije koja se koristi[3]

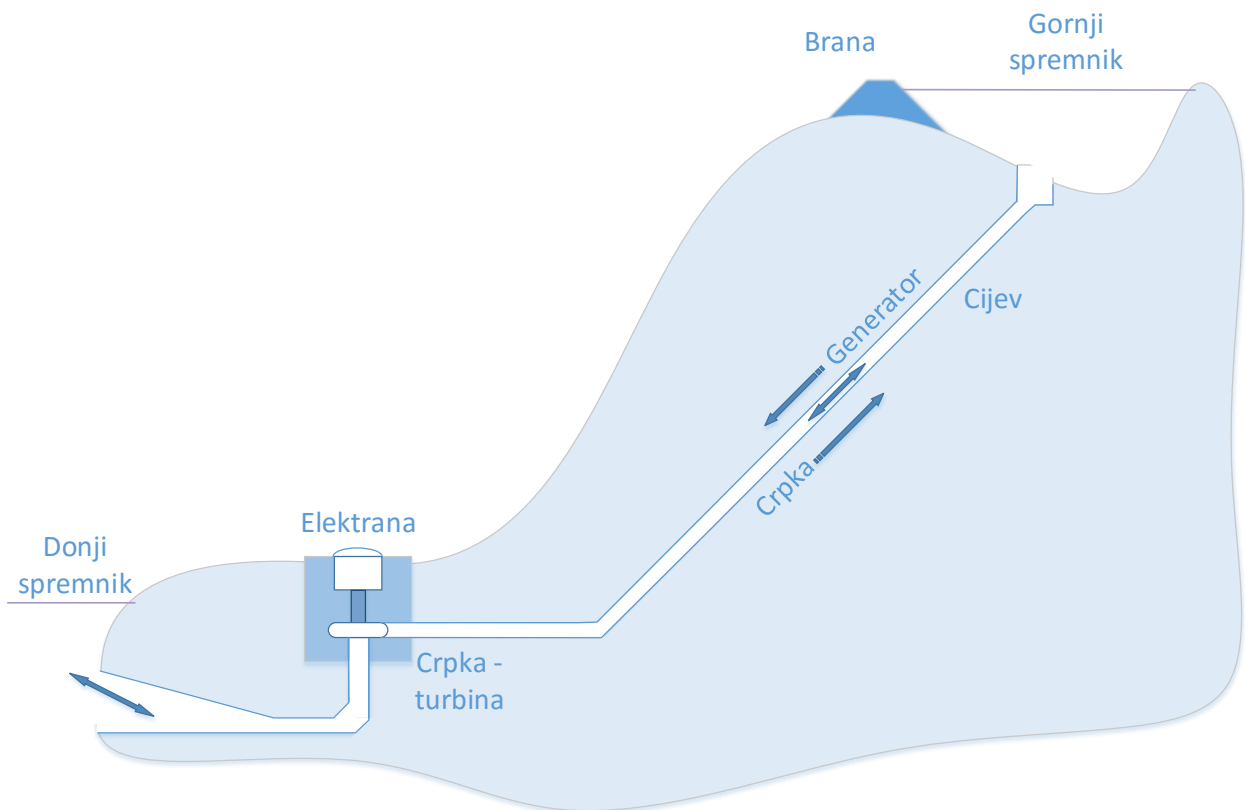
#### 3.1 Mehanički sustavi za pohranu električne energije

Najčešći mehanički sustavi za pohranu električne energije su crpno-akumulacijske hidroelektrane, komprimirani zrak i zamašnjak.

##### 3.1.1 Crpno-akumulacijske hidroelektrane

Sa preko 120 GW, crpno-akumulacijske hidroelektrane kao sustav za pohranu energije predstavljaju skoro 99% u svijetu instaliranih sustava za pohranu električne energije [3]. Konvencionalna crpno-akumulacijska hidroelektrana koristi dva spremnika za vodu na različitim visinama pa tako za vrijeme malih opterećenja crpi vodu iz donjeg u gornji spremnik (punjenje) kao što je prikazano na slici 3.2. Zatim, kada je potrebno, voda teče iz gornjeg u donji spremnik te tako pokreće turbinu sa generatorom za proizvodnju električne energije (pražnjenje).





**Slika 3.2** *Princip rada akumulacijske hidroelektrane*

Postoje različite opcije za gornji i donji rezervoar, npr. visoka brana može se koristiti kao crpno-akumulacijska hidroelektrana za pohranu električne energije. Za donje spremnike mogu se potopiti rudnici i ostale podzemne šupljine, a također su tehnički moguća i rješenja sa otvorenim morem. Prva crpno-akumulacijska hidroelektrana koja koristi morsku vodu (prikazana na slici 3.3) je izgrađena u Japanu 1999. (Yanbaru, 30MW) [3].



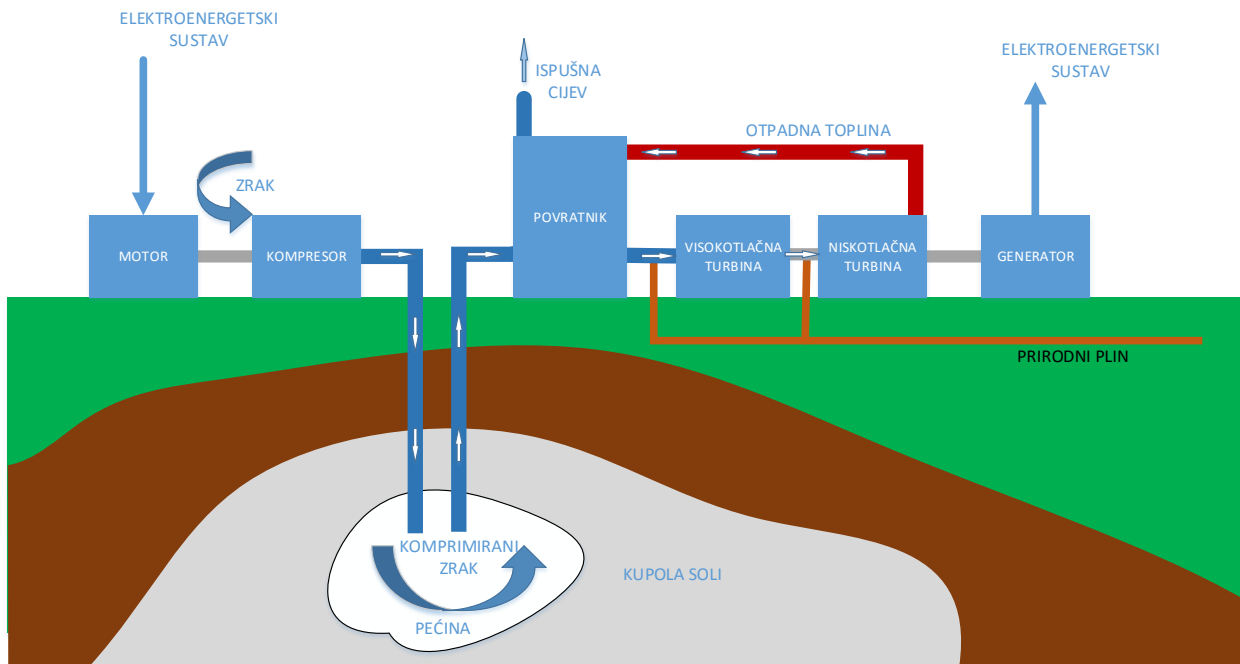
**Slika 3.3** Yanbaru 30MW crpno-akumulacijska hidroelektrana [4]

Crpno-akumulacijske hidroelektrane za pohranu električne energije postoje već dugo vremena. Prve takve elektrane su korištene u Italiji i Švicarskoj još u 1890 [3].

Tipično vrijeme pražnjenja je u rasponu od nekoliko sati do nekoliko dana. Učinkovitost crpno-akumulacijskih hidroelektrana je u rasponu od 70% do 85% [3]. Njihova prednost je vrlo dug vijek trajanja. Glavni nedostatak je ovisnost o topografskim uvjetima.

### **3.1.2 Pohrana energije komprimiranim zrakom**

Skladištenje energije pomoću komprimiranog zraka (plina) (slika 3.4) je tehnologija poznata i koristi se još od 19. stoljeća za različite industrijske primjene [3]. Zrak se koristi kao medij za pohranu zbog raspoloživosti. Električna energija se koristi za kompresiju zraka te se taj zrak pohranjuje bilo u podzemnoj strukturi ili nadzemnom sustavu spremnika ili cijevi.

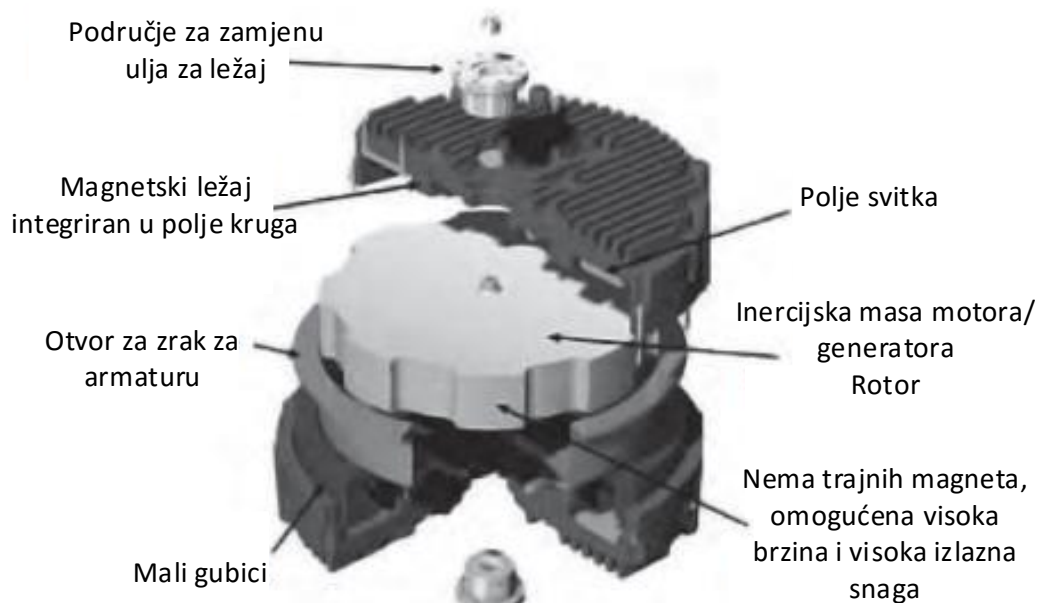


**Slika 3.4** Sustav pohrane energije komprimiranim zrakom [3]

Po potrebi se komprimirani zrak miješa sa prirodnim plinom, spali i širi u modificiranoj plinskoj turbini. Tipična podzemna skladištenja su špilje ili napušteni rudnici. Ako se toplina oslobođena tijekom kompresije potroši na hlađenje, a ne na pohranu, zrak se mora dogrijati prije ekspanzije u turbini. Ovaj proces naziva se diabatska pohrana energije komprimiranim zrakom i rezultira slabom povratnom učinkovitosti koja je manja od 50% [3]. Takve elektrane imaju visoku pouzdanost te su sposobne za pokretanje bez dodatne „vanjske“ energije. Prednost pohrane energije komprimiranim zrakom je velik kapacitet, a nedostaci su niska učinkovitost i geografska ograničenja lokacije.

### 3.1.3 Pohrana energije pomoću zamašnjaka

Kod pohrane energije pomoću zamašnjaka rotacijska energija je pohranjena u ubrzanom rotoru masivnog rotirajućeg cilindra. Glavne komponente zamašnjaka su rotirajuće tijelo/cilindar (sastavljen od oboda pričvršćenog na osovinu), ležajevi i uređaj za prijenos (motor/generator montiran na statoru) što je prikazano na slici 3.5. Energija u zamašnjaku se održava držeći rotirajuće tijelo pri konstantnoj brzini. Povećanje brzine rezultira većom pohranom energije. Da bi se ubrzao zamašnjak dovodi se električna energija pomoću uređaja za prijenos. Prilikom smanjenja brzine rotacije zamašnjaka, električna energija se odvodi pomoću istog uređaja za prijenos.



**Slika 3.5** Zamašnjak [3]

Zamašnjaci prve generacije koji su dostupni od otprilike 1970. godine koristili su veliko čelično rotirajuće tijelo na mehaničkim ležajevima [3]. Napredni sustavi pohrane energije pomoću zamašnjaka imaju rotore izrađene od ugljičnih vlakana visoke čvrstoće na magnetskim ležajevima unutar kućišta u kojemu je vakuum te se vrte brzinom 20000 do preko 50000 okretaja po minuti [3]. Glavne značajke zamašnjaka su izvrsna stabilnost ciklusa, dug životni vijek, malo održavanja, visoka gustoća energije i korištenje ekološki inertnog materijala. Međutim, zamašnjaci imaju visoku razinu samo-pražnjenja zahvaljujući otporu zraka i gubicima u ležajevima te imaju nisku učinkovitost.

Današnji zamašnjaci komercijalno su razmješteni za kvalitetu električne energije u industriji te za neprekidno napajanje električnom energijom, uglavnom u hibridnoj izvedbi. Nastoji se optimizirati zamašnjake kako bi produžili postupak trajanja (do nekoliko sati) kako bi ih koristili kao uređaj za pohranu u vozilima i elektranama [3].

## 3.2 Elektrokemijski sustavi pohrane električne energije

U ovom poglavlju opisane su različite vrste baterija. Većina od njih je tehnološki zrela za praktičnu primjenu. Prvo je navedeno šest sekundarnih vrsta baterija: olovno kiselinske, nikal-kadmij i nikal-metal hibrid, litiji-ion, metal zrak, natrij-sumpor i natrij nikal-klorid, zatim slijede dvije vrste protočnih baterija: redoks protočna baterija i hibrid protočna baterija. U konvencionalnim sekundarnim baterijama energija se puni i prazni u aktivnim masama elektroda. Protočne baterije su također baterije za ponovno punjenje, ali kod njih je energija pohranjena u jednoj ili više elektro-aktivnoj vrsti koja je otopljena u tekućem elektrolitu. Elektroliti su pohranjeni izvana u spremnicima i pumpaju se kroz elektrokemijsku ćeliju koja pretvara kemijsku energiju izravno u električnu energiju i obratno. Snaga je definirana po veličini i dizajnu elektrokemijske ćelije te kao i energija ovisi o veličini spremnika. Izvorno je razvijena od strane NASA-e u ranim 70-im godinama za dugoročne svemirske letove[3].

### 3.2.1 Olovno-kiselinska baterija (LA)

Olovno-kiselinske baterije su najkorištenije baterije na svijetu te su u komercijalnoj upotrebi od oko 1890 [3]. Koriste se i kao mobilne i kao stacionarne. Njihova tipična uporaba jest u sustavima za napajanje u nuždi, samostalni sustavi sa fotonaponom, sustav baterija za ublažavanje izlazne fluktuacije iz energije vjetrova, kao i akumulatori u vozilima. U prošlosti (od 1910. – 1945.) mnogo olovno-kiselinskih baterija korišteno je za pohranu energije mreži [3]. Stacionarne olovno-kiselinske baterije moraju zadovoljiti daleko više standarde kvalitete proizvoda nego akumulatori. Tipični vijek trajanja od 6 do 15 godina s životnim vijekom od 1500 ciklusa na 80% dubini pražnjenja te imaju kružnu učinkovitost oko 80% do 90% [3]. Olovno-kiselinske baterije nude dobro istraženu tehnologiju i nisku cijenu. Postoje mnoge vrste olovno-kiselinskih baterija, na primjer ventilirano kućište i nepropusno zapečaćeno kućište. Troškovi za stacionarne baterije su trenutno daleko veći nego za akumulatore. Masovna proizvodnja olovno-kiselinskih baterija za stacionarne sustave može dovesti do smanjenja cijena.

Jedan nedostatak ovih baterija je smanjenje korisnog kapaciteta kada se isprazni velika količina energije. Na primjer, ako se baterija isprazni u jednom satu, samo oko 50% do 70% nazivnog kapaciteta ostaje dostupno [3]. Ostali nedostaci su niža gustoća energije i upotreba olova. Prednosti su povoljan omjer cijena/performansi, lako recikliranje i jednostavna tehnologija punjenja. Trenutno istraživanje i razvoj olovno kiselinskih baterija usmjereno je na mikro-hibrid električna vozila.

### **3.2.2 Nikal-kadmij i nikal-metal hibrid baterije (NiCd, NiMH)**

Prije komercijalnog uvođenja nikal-metal hibrid (NiMH) baterije oko 1995, nikal-kadmij (NiCd) baterije su bile u komercijalnoj upotrebi od oko 1915 [3]. U odnosu na olovno kiselinske baterije, baterije na bazi nikla imaju nešto veću gustoću energije i veći broj ciklusa.

S tehničke točke gledišta, nikal-kadmij baterije su jedine baterije koje su sposobne za rad čak i pri niskim temperaturama od  $-20^{\circ}\text{C}$  do  $-40^{\circ}\text{C}$  [3]. Veliki sustavi nikal-kadmij baterija rade slično kao olovno kiselinske baterije. Međutim, zbog toksičnosti kadmija, ove baterije se trenutno koriste samo za stacionarne primjene u Europi. Od 2006. godine su zabranjene za upotrebu [3].

Nikal-metal hibrid baterije razvijene su kao zamjena za nikal-kadmij baterije. Tako one imaju sve pozitivne osobine nikal-kadmij baterija, s iznimkom maksimalne nazivne snage koja je još deset puta manja u odnosu na nikal-kadmij i olovno kiselinske baterije. Nadalje, nikal-metal hibrid baterije imaju mnogo veću energetska gustoću.

U prijenosnim i mobilnim sustavima, zapečaćene nikal-metal hibrid baterije su zamijenjene litij-ionskim baterijama. S druge strane, hibridna vozila dostupna na današnjem tržištu djeluju gotovo isključivo sa zatvorenim nikal-metal hibrid baterijama jer su one robusne i daleko sigurnije od litij-ionskih baterija. NiMH baterije trenutno koštaju otprilike jednako kao i litij-ionske baterije.

### **3.2.3 Litij-ionske baterije (Li-ion)**

Litij-ionske baterije (slika 3.6) postale su najvažnija tehnologija za pohranu u području prijenosnih i mobilnih uređaja (npr. prijenosno računalo, mobilni telefon, električni bicikl, električni automobil) od oko 2000. godine [3].



**Slika 3.6** Tipični Li-ion dizajn u obliku prizme i baterijski moduli [3]

Visoki nazivni napon ćelije od 3,7 V znači da se broj ćelija u nizu s pripadajućim vezama i elektronikom može smanjiti kako bi se dobio ciljani napon [3]. Na primjer, jedna litij-ionska ćelija može zamijeniti tri NiCd ili NiMH ćelije koje imaju napon ćelije od samo 1,2 V [3]. Još jedna prednost litij-ionskih baterija je njihova visoka gravimetrijska gustoća energije te mogućnost velikog smanjenja troškova zbog masovne proizvodnje. Iako Li-ion baterije imaju udio od preko 50% u malim i prijenosnim uređajima na tržištu, još uvijek postoje neki izazovi za razvoj Li-ion baterija većih razmjera [3]. Glavna prepreka je visoka cijena (više od 600 USD/kWh) zbog posebnog pakiranja i interne zaštite od preopterećenja [3].

Litij-ionske baterije općenito imaju vrlo visoku učinkovitost, tipično u rasponu od 95% do 98% [3]. Mogu ostvariti gotovo bilo kakvo vrijeme pražnjenja, od sekunde do tjedna, što ih čini vrlo fleksibilnom univerzalnom tehnologijom za pohranu. Standardna ćelija ima 5000 punih ciklusa, ali moguće su i veće stope ciklusa, uglavnom ovisno o materijalu za elektrode [3]. S obzirom da su litij-ionske baterije još uvijek skupe, one se mogu natjecati sa olovno kiselinskim baterijama za primjenu u sustavima koji zahtijevaju kratko vrijeme pražnjenja (na primjer kao rezerva za primarnu regulaciju).

Sigurnost je ozbiljan problem u tehnologiji litij-ionskih baterija. Većina metal-oksidnih elektroda su toplinski nestabilne i mogu se razgraditi na povišenim temperaturama, oslobađajući kisik koji može dovesti do termičkog pobjega. Da bi se smanjio taj rizik, litij-ionske baterije su opremljene jedinicom za praćenje kako bi se izbjeglo prekomjerno punjenje i pražnjenje. Obično je instaliran i ravnotežni naponski krug za nadzor naponske razine svake pojedine ćelije kako bi se spriječilo

naponsko odstupanje među njima. Li-ion tehnologija i dalje se razvija, a postoji znatan potencijal za daljnji napredak. Istraživanje je usmjereno na razvoj materijala za katodu.

### **3.2.4 Metal-zrak baterije (Me-air)**

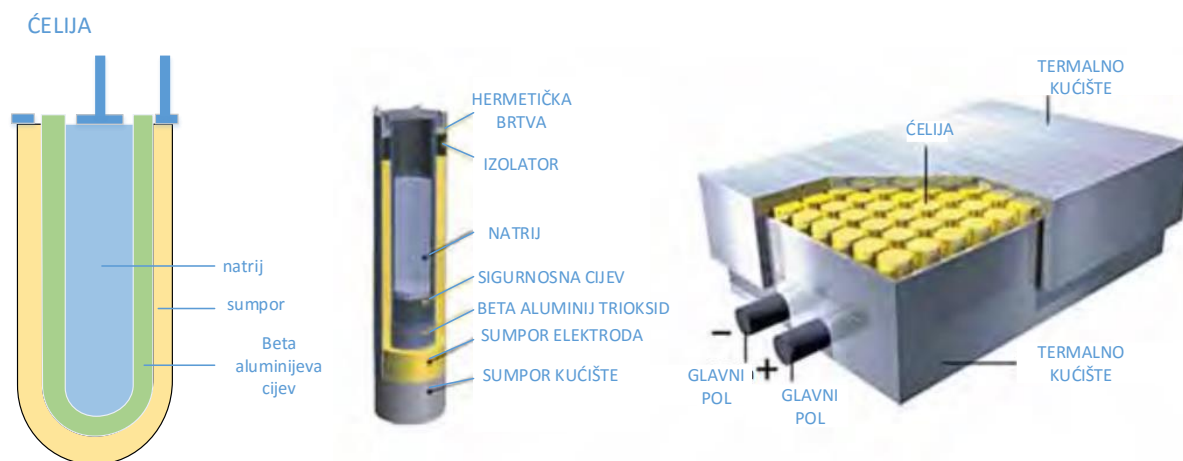
Metal-zrak elektrokemijska ćelija sastoji se od anode izrađene od čistog metala i katode spojene na neiscrpan dovod zraka. Za elektrokemijsku reakciju iz zraka se koristi samo kisik. Među raznim metal-zrak kemijskim parovima najatraktivnija je litij-zrak, jer je teoretska specifična energija bez kisika (kisik nije pohranjen u bateriji) 11,14 kWh/kg, što je oko sto puta više od ostalih vrsta baterija pa čak i veća od benzina (10,15 kWh/kg) [3]. Međutim, visoka reaktivnost litija sa zrakom i vlagom može uzrokovati požar, što je visok rizik sigurnosti.

Trenutno samo cink-zrak baterija, sa teoretskom specifičnom energijom bez kisika od 1,35 kWh/kg je tehnički izvediva [3]. Cink-zrak baterije imaju neka svojstva gorivih ćelija i konvencionalnih baterija: cink je gorivo, brzina reakcije može se kontrolirati promjenom protoka zraka i oksidirana cink/elektrolit pasta može se zamijeniti sviježom pastom. Razvojem tanke elektrode na temelju gorivih ćelija izrađene su male gumb prizmaste ćelije za slušna pomagala i medicinske potrebe, a posebno za srčanu telemetriju. Punjive cink-zrak ćelije imaju poteškoća u dizajnu jer talog cink elektrolita mora se strogo kontrolirati. Električno punjivi metal-zrak sustav potencijalno nudi niske cijene materijala i visoke specifične energije, ali nijedan takav sustav nije se probio na tržište.

### **3.2.5 Natrij-sumpor baterije (NaS)**

Natrij-sumpor baterije, sastoje se od tekućeg (rastopljenog) sumpora na pozitivnoj elektrodi i tekućine (rastaljeni) natrija na negativnoj elektrodi te od beta-aluminijevog krutog elektrolita koji razdvaja aktivni dio, što je prikazano na slici 3.7. Temperatura baterije održava se između 300°C i 350°C da bi se elektrode otopile [3]. NaS baterije postižu tipični životni vijek od oko 4500 ciklusa i imaju vrijeme pražnjenja od 6,0 do 7,2 sata [3]. Učinkovite su (povratna učinkovitost je oko 75%) i imaju brzu reakciju [3].





**Slika 3.7** NaS baterija: Dizajn ćelije i 50kW modul [3]

NaS tehnologija baterija je predstavljena na 200 lokacija u Japanu, uglavnom za peglanje vrhova, a Njemačka, Francuska, SAD također imaju NaS baterije u pogonu [3]. Glavni nedostatak jest da je za održavanje radne temperature potreban izvor topline, koji koristi vlastitu energiju pohranjenu u bateriji te tako djelomično smanjuje performanse baterije. U svakodnevnoj upotrebi temperatura baterije gotovo se može održavati samo vlastitom toplinom reakcije, uz odgovarajuće dimenzioniranu izolaciju. Od oko 1990 NaS baterije su proizvedene od strane jedne tvrtke u Japanu, s minimalnom veličinom modula od 50 kW i tipično 300 kWh do 360 kWh [3]. Za sada nije praktično koristiti samo jedan izolirani modul. Budući da se 20 modula spaja u jednu bateriju, minimalan raspon komercijalne snage i energije je reda veličine 1 MW i 6,0 MWh do 7,2 MWh [3]. Ove baterije su pogodne za aplikacijesa dnevnim ciklusom. Kako je vrijeme odziva u rasponu od nekoliko milisekundi te NaS baterije ispunjavaju uvjete za stabilizaciju mreže, ova tehnologija je vrlo zanimljiva komunalnim uslugama i velikim potrošačima.

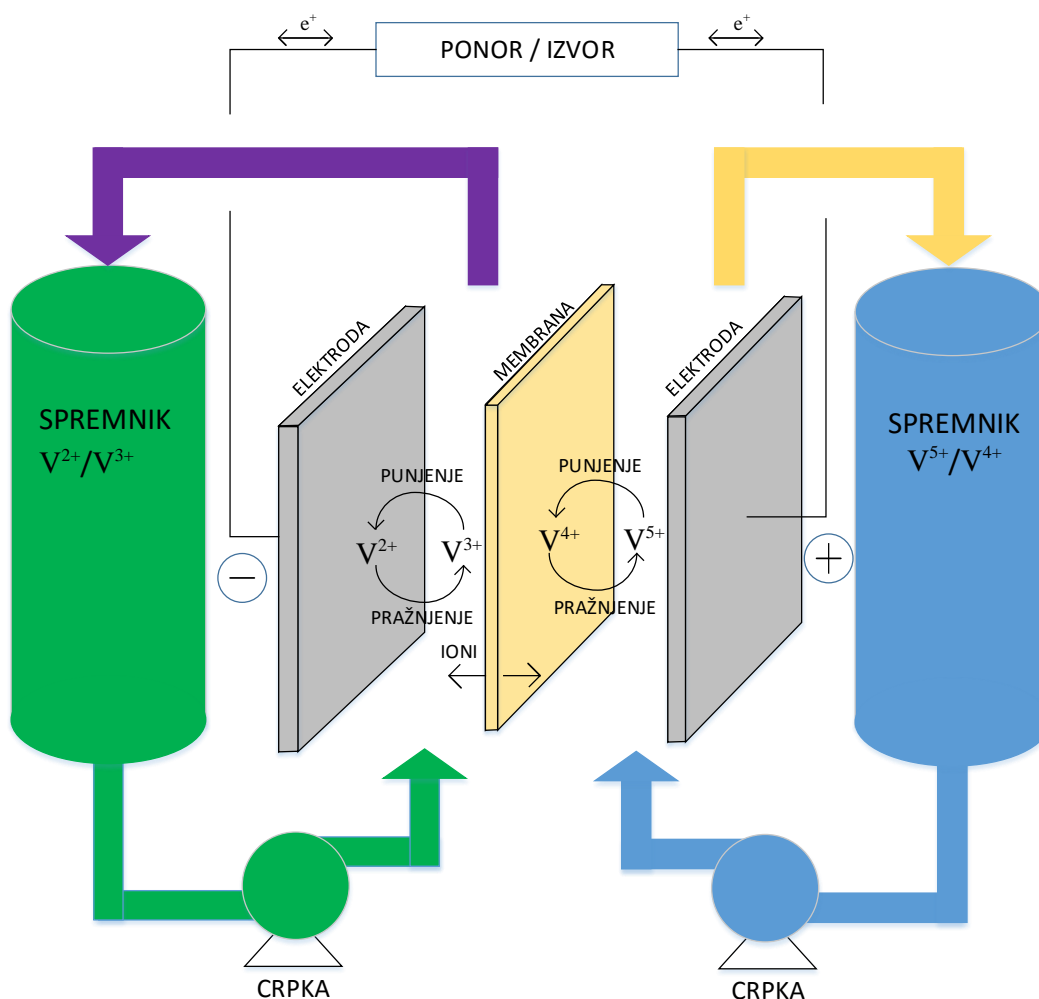
### 3.2.6 Natrij nikal klorid baterije (NaNiCl)

Natrij nikal klorid (NaNiCl) baterija, poznatija kao zebra (engl. *Zero Emission Battery Research*) baterija je, kao i natrij-sumpor, visokotemperaturna baterija te je dostupna od 1995. Godine [3]. Radna temperatura ove baterije je oko 270°C, a koristi nikal klorid umjesto sumpora za pozitivnu elektrodu [3]. Može izdržati ograničenu prepunjenost i pražnjenje te ima potencijalno bolje sigurnosne značajke i veći napon ćelije u odnosu na natrij-sumpor baterije. Ima tendenciju da razvije nizak otpor kada dođe do greške, a to je razlog zbog čega greške u ćelijama vezanim u seriju rezultiraju samo gubitkom napona jedne ćelije umjesto kvara cijelog sustava. Ove baterije su ugrađene u nekoliko električnih vozila (Think City, Smart EV) [3]. Trenutno istraživanje

usmjereno je na razvoj naprednije verzije ZEBRA baterije s većom gustoćom snage za hibridna vozila, a također i razvoj visoko energetskih verzija za spremanje obnovljivih izvora energije za izravnavanje opterećenja i industrijsku primjenu.

### 3.2.7 Redoks protočna baterija (RFB)

U redoks protočnoj bateriji dva tekuća elektrolita sadrže otopljene ione metala. Elektroliti na negativnoj i pozitivnoj elektrodi nazivaju se anolit i katolit, respektivno. Tijekom punjenja i pražnjenja ioni metala ostaju otopljeni u tekućem elektrolitu kao tekućina te promjena faze nema utjecaja na odvijanje tih aktivnih masa. Anodni i katodni elektrolitprotiču kroz porozne elektrode, odvojene membranom koja omogućuje protonima da prođu kako je prikazano na slici 3.8. Tijekom izmjene naboja struja teče preko elektroda koje se mogu koristiti za napajanje uređaja. Tijekom pražnjenja elektrode se kontinuirano opskrbljuju s otopljenim aktivnim masama iz spremnika; nakon pretvorbe dobiveni produkt se odvede u spremnik.



Slika 3.8 Shematski prikaz vanadiumredoks protočne baterije [3]

Teoretski, redoks protočnu baterijumoguće je „napuniti“ u roku od nekoliko minuta ispumpavanjem ispražnjenog elektrolita i zamjenom sa punim elektrolitom. Zbog toga su te baterije u razmatranju za mobilnu primjenu. Međutim, do sada je gustoća energije od elektrolita preniska za električna vozila.

Do danas su ispitani i istraženi razni redoks parovi, a vanadiumredoks protočna baterija (VRFB) najdalje je razvijena. Glavna prednost ove baterije je korištenje iona istog materijala na obje strane. Iako se prijelaz iona metala preko membrane ne može spriječiti u potpunosti (što je slučaj za svaku redoks protočnu bateriju), kod VRFB rezultat je gubitak energije. Kod ostalih RFB koji koriste ione različitih metala, prijelaz uzrokuje nepovratne degradacije elektrolita i gubitak kapaciteta.

### **3.2.8 Hibrid protočna baterija (HFB)**

Kod hibrid protočne baterije jedna od aktivnih masa interno je pohranjena u elektrokemijskoj ćeliji, a preostali tekući elektroliti pohranjuju se izvana u spremniku. Stoga su hibridne protočne baterije kombinacija značajki konvencionalnih sekundarnih baterija i redoks protočnih baterija: kapacitet baterije ovisi o veličini elektrokemijske ćelije. Tipični primjeri HFB su Zn-Cu i Zn-Br sustavi. Kao membrana se koristi mikroporozni poliolefinski materijal. Razne tvrtke rade na komercijalizaciji Zn-Br hibrid protočnih baterija.

## **3.3 Kemijski sustavi pohrane električne energije**

Vodik i sintetički prirodni plin kao sekundarni nosači energije bi mogli imati značajan utjecaj na skladištenje električne energije u velikim količinama. Glavna svrha takvog kemijskog sustava za pohranu energije je da koriste „višak“ struje za proizvodnju vodika preko vode elektrolizom. Kada je vodik proizveden, različiti načini su dostupni da ga se iskoristi kao energenta, bilo kao čisti vodik ili kao sintetički prirodni plin. Ukupna učinkovitost vodika i sintetičkog prirodnog plina je niska u usporedbi s tehnologijama za pohranu kao što su crpno-akumulacijska hidroelektrana i litij-ion, ali kemijski sustavi pohrane energije je jedini koncept koji omogućuje pohranu velike količine energije, do raspona TWh i za veće vremensko razdoblje pa čak i kao sezonsko skladištenje [3]. Još jedna prednost vodika i sintetičkog prirodnog plina: njih kao univerzalne energente moguće je koristiti u različitim sektorima kao što su transport, mobilnost, grijanje i kemijska industrija.

### 3.3.1 Vodik (H<sub>2</sub>)

Takav tipičan sustav za pohranu sastoji se od elektrolizera, spremnika vode i gorivih ćelija. Elektrolizer je elektrokemijski konverter koji uz pomoć električne energije razdvaja vodu na vodik i kisik. Vodik se pohranjuje u plinskim bocama ili spremnicima pod tlakom i tako se može čuvati praktički na neodređeno vrijeme. Za proizvodnju električne energije, vodik i kisik teku u gorivu ćeliju, gdje se odvija elektrokemijska reakcija koja je obrnuta od razdvajanja vode: vodik i kisik reagiraju i stvaraju vodu, oslobađa se toplina i generira struja. Iz ekonomskih i praktičnih razloga kisik nije pohranjen i ispušta se u atmosferu tijekom elektrolize, a za vrijeme proizvodnje električne energije uzima se iz zraka.

Osim gorivih ćelija, plinski motori, plinske turbine i kombinacija ciklusa plinske i parne turbine su mogućnosti za proizvodnju električne energije. Sustavi s gorivim ćelijama (manje od 1 MW) i plinskim motorima (ispod 10 MW) mogu se koristiti za kombiniranu proizvodnju toplinske i električne energije u decentraliziranim postrojenjima [3]. Plinske i parne turbine s do nekoliko stotina MW bi se mogle koristiti kao vršne elektrane. Ukupna AC-AC učinkovitost je oko 40% [3].

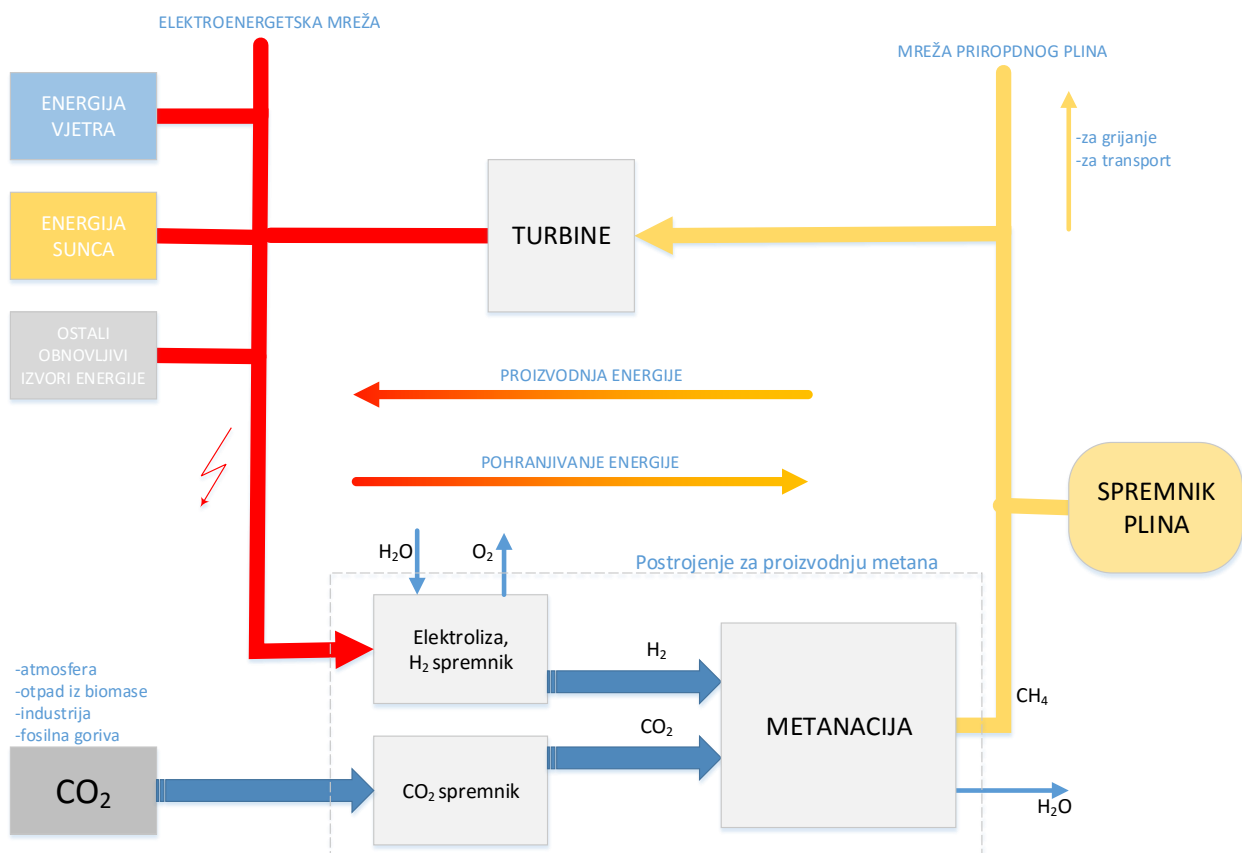
Postoje različiti načini za skladištenje vodika, bilo u obliku plina pod visokim tlakom tekućina na vrlo niskoj temperaturi, adsorbiran na hidridima metala ili kemijski vezan u kompleks hidrida. Međutim, za stacionarne primjene spremište plina pod visokim tlakom je najpopularnije rješenje. Manja količina vodika može biti pohranjena u nadzemne spremnike ili boce pod pritiskom od 900 bara [3]. Za veće količine vodika mogu se koristiti podzemni cijevni sustavi pa čak i spilje s više od 100 000 m<sup>3</sup> obujma pod pritiskom do 200 bara [3].

Do sada nije bilo nikakvih komercijalnih sustava za pohranu vodika korištenog za obnovljive izvore energije. Razni projekti istraživanja i razvoja provedeni su u posljednjih 25 godina te su uspješno pokazali izvedivost tehnologije vodika [3]. Primjeri su projekt samodovoljnog otoka Utsira u Norveškoj i hibridna elektrana u Enertagu u Njemačkoj [3]. Energija vjetra se koristi za proizvodnju vodika pomoću elektrolize ako postoji višak energije. Po potrebi, pohranjeni vodik se dodaje bioplenu te se koristi za pokretanje plinskog motora.

Velika postrojenja za elektrolizu (do 160 MW) su najsuvremenija za primjenu u industriji te ih je nekoliko izgrađeno na različitim lokacijama (Norveška, Egipat, Peru itd.) u kasnim 1990-im [3].

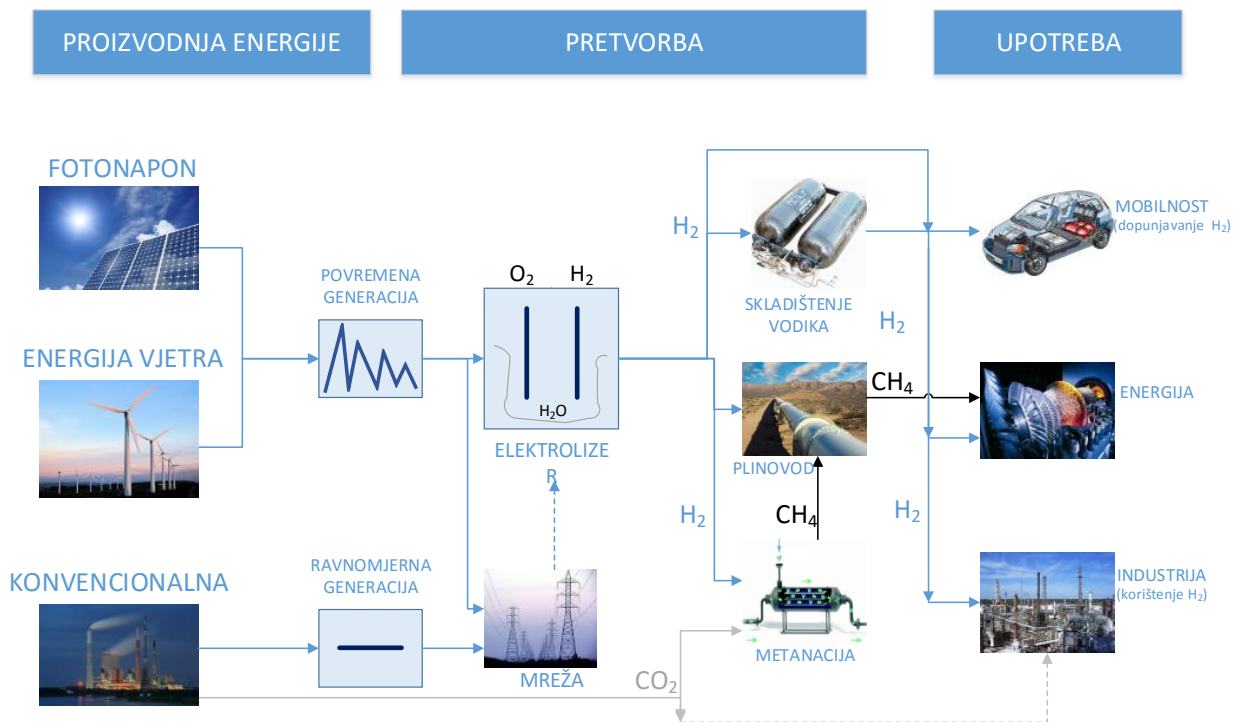
### 3.3.2 Sintetički prirodni plin (SNG)

Sinteza metana (koji se naziva i sintetički plin) je druga opcija za pohranu električne energije kao kemijske energije. Ovdje je potreban još jedan korak nakon cijepanja vode u elektrolizeru, korak u kojem vodik i ugljični dioksid reagiraju u metan. Kao što je slučaj kod vodika, proizvedeni sintetički prirodni plin može se pohraniti u spremnicima pod tlakom, pod zemljom, ili se uvodi direktno u plinsku mrežu. Nekoliko izvora  $CO_2$  moguće je koristiti za dobivanje metana, poput elektrana na fosilna goriva, industrijskih postrojenja ili bioplinskih postrojenja. Proces pohrane metana prikazan je na slici 3.9.



**Slika 3.9** Koncept korištenja metana za pohranu energije sunca i vjetra

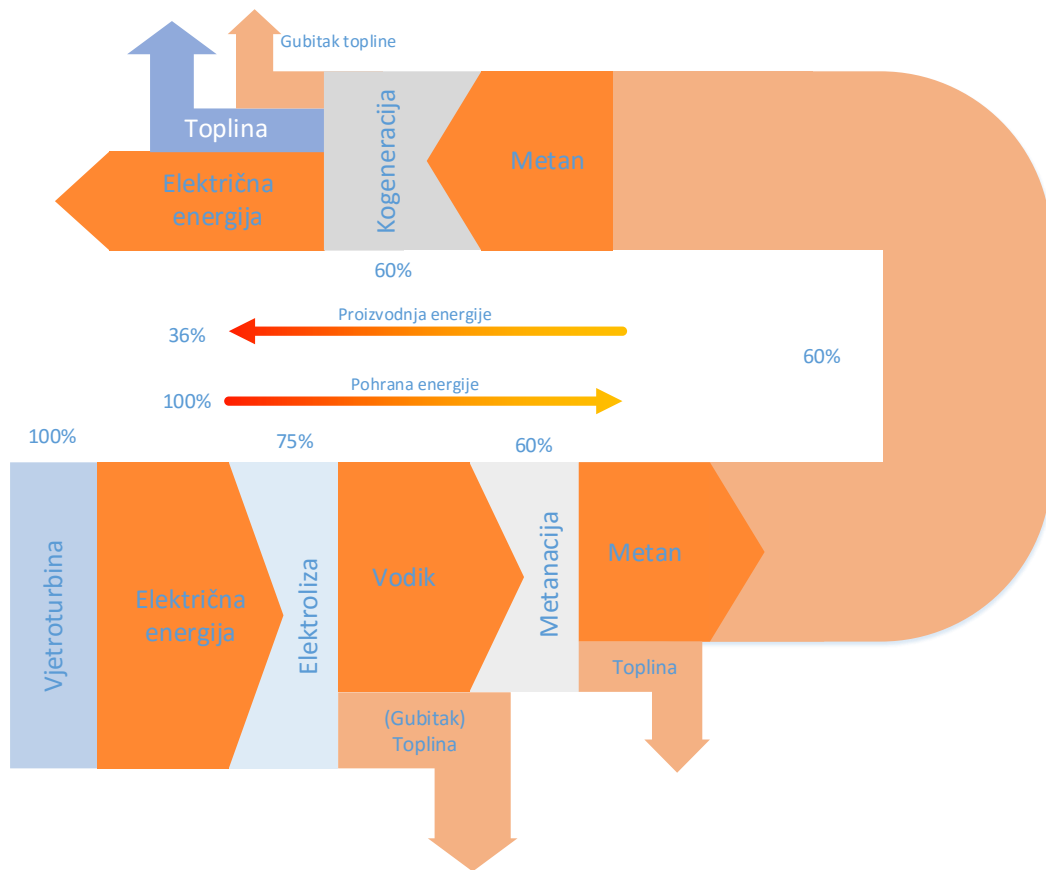
Da bi se smanjili gubici energije, transport plinova  $CO_2$  (iz izvora  $CO_2$ ) i  $H_2$  (iz elektrolize) u postrojenja za dobivanje metana treba izbjegavati. Proizvodnja sintetičkog prirodnog plina je bolja na mjestima gdje su dostupni  $CO_2$  i višak električne energije.



**Slika 3.10** Ukupni koncept korištenja vodika i sintetičkog prirodnog plina kao energenata

Glavna prednost ovog pristupa je korištenje već postojeće infrastrukture plinske mreže (npr. u Europi). Čisti vodik može se pustiti u plinsku mrežu samo do određene koncentracije, kako bi smjesa plina bila u skladu sa specifikacijama (npr. ogrjevna vrijednost). Štoviše, metan ima veću gustoću energije te transport cjevovodima zahtijeva manje energije (veća gustoća plina). Cjelovit pregled kombinirane upotrebe vodika i sintetičkog prirodnog plina kao tehnike skladištenja kemijske energije prikazan je na slici 3.10.

Glavni nedostatak sintetičkog prirodnog plina je relativno niska učinkovitost zbog gubitaka u elektrolizi, procesu dobivanja metana, skladištenja, transporta i naknadne energije. Gubici u procesu dobivanja metana prikazani su na slici 3.11.



**Slika 3.11** Gubici energije pri procesu dobivanja metana [1]

Gubici energije pri procesu dobivanja metana u najvećoj mjeri su gubici u obliku topline.

### 3.4 Električni sustavi pohrane električne energije

#### 3.4.1 Ultra kondenzator (DCL)

Elektrokemijski kondenzatori dvostrukog sloja (DCL) još poznati kao ultra kondenzatori su tehnologija koja je poznata već 60 godina [3]. Oni popunjavaju prazninu između klasičnih kondenzatora koji se koriste u elektronici i standardne baterije, zbog svoje gotovo neograničene stabilnosti ciklusa, izuzetno visoke snage, kao i njihove veće sposobnosti za pohranu energije u usporedbi s tradicionalnim kondenzatorima. Ova tehnologija i dalje pokazuje velik razvojni potencijal koji bi mogao dovesti do znatno veće kapacitivnosti i energetske gustoće u odnosu na konvencionalne kondenzatore, čime se omogućuje kompaktnost dizajna.

Dvije glavne značajke su izuzetno visoka vrijednost kapacitivnostite mogućnost vrlo brzih punjenja i pražnjenja zbog izuzetno niskog unutarnjeg otpora, što je značajka koja nije dostupna kod uobičajenih baterija.

Ipak, druge prednosti su visoka pouzdanost, održavanje, dugi životni vijek i rad u širokom temperaturnom području i u različitim okruženjima (toplo, hladno, vlažno). Vijek trajanja doseže milijun ciklusa (ili deset godina rada) bez ikakve degradacije, osim otapala koje se rabi u kondenzatorima, čiji nedostatak je pogoršanje u 5 ili 6 godina, bez obzira na broj ciklusa [3]. Oni su ekološki prihvatljivi i lako ih je reciklirati ili neutralizirati. Učinkovitost im je tipično oko 90% i vrijeme pražnjenja je u rasponu od nekoliko sekundi do nekoliko sati [3].

Mogu dosegnuti određenu gustoću snage koja je oko deset puta veća od gustoće snage konvencionalnih baterija (samo litij-ionske baterije vrlo visoke snage mogu dosegnuti gotovo istu specifičnu gustoću snage), ali je njihova specifična gustoća energije oko deset puta manja.

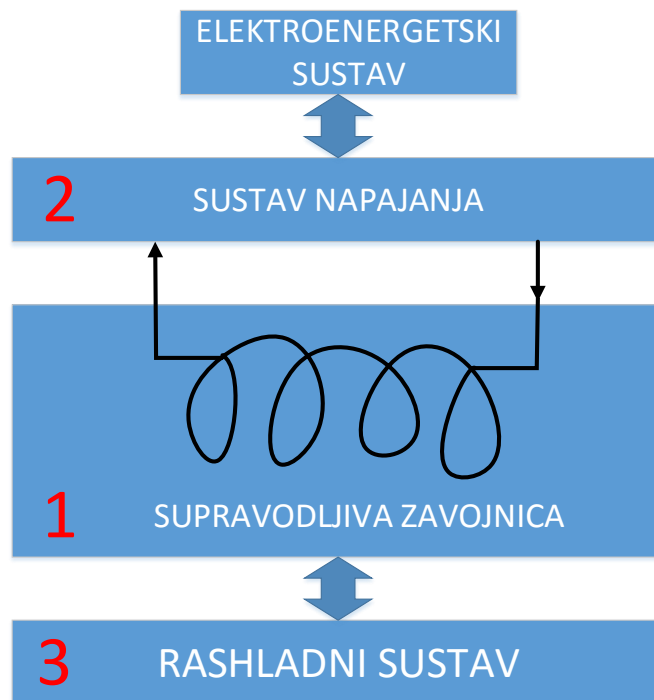
Zbog svojih svojstava, ultra kondenzatori su pogodni za aplikacije sa velikim brojem kratkog punjenja /pražnjenja, gdje se može koristiti njihova karakteristika visokih performansi. Ultra kondenzatori nisu pogodni za skladištenje energije kroz duže vrijeme zbog svoje visoke stope samo-pražnjenja, njihove niske gustoće energije i visokih troškova ulaganja.

Od oko 1980. godine su u širokoj primjeni u potrošačkoj i energetskej elektronici [3]. Ultra kondenzator je također idealan kao neprekidni izvor napajanja za premošćivanje kratkih kvarova napona. Novi zahtjev mogao bi biti električno vozilo, gdje ih se može koristiti kao među-spremnik za proces ubrzanja i regenerativnog kočenja.

### **3.4.2 Supravodljivi magnetski svitak (SMES)**

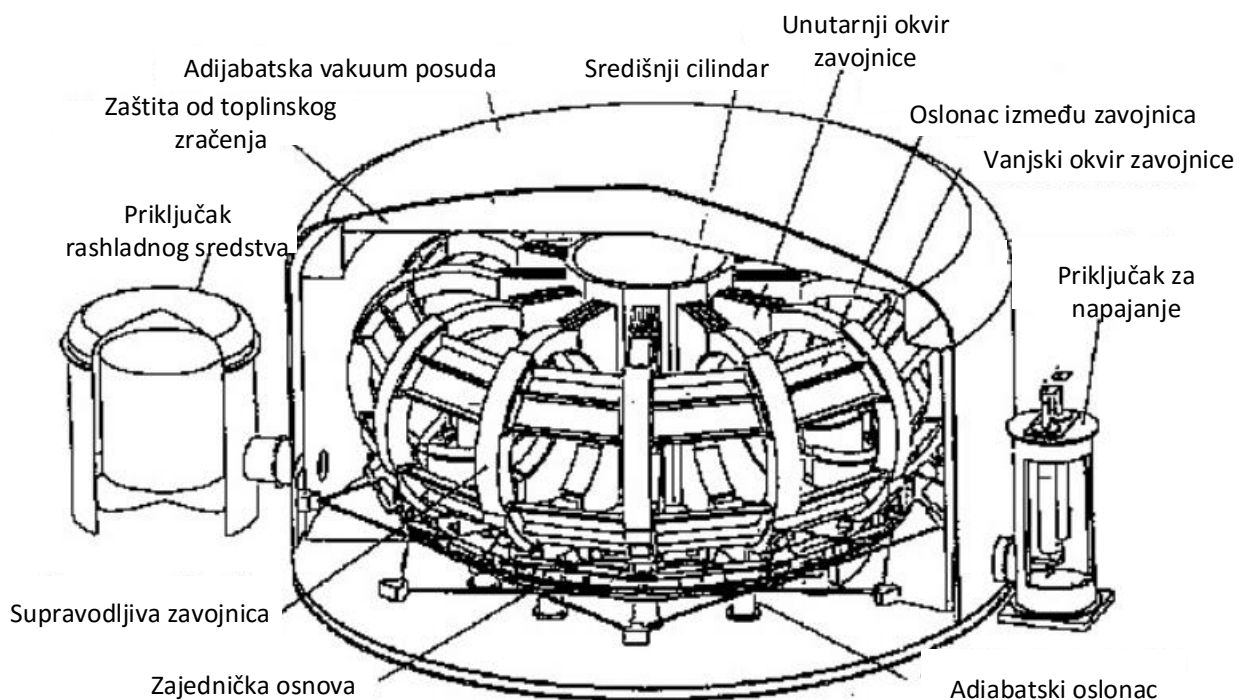
Supravodljivi magnetski svitak radi na elektrodinamičkom principu. Energija je pohranjena u magnetskom polju koje stvara istosmjerna struja u supravodljivom svitku, koji se čuva na temperaturi nižoj od njegove supravodljive kritične temperature. Prije sto godina, za vrijeme otkrića supravodljivosti, bila je potrebna temperatura od oko 4°K [3]. Mnogo istraživanja i nešto sreće doveli su do supravodiča s višim kritičnim temperaturama. Materijali koji su dostupni danas, mogu funkcionirati na oko 100°K [3]. Glavna komponenta ovog sustava za pohranu je zavojnica napravljena od supravodljivih materijala. Dodatne komponente kao što su napajanje i rashladni sustav prikazane su na slici 3.12.





**Slika 3.12** Sastavni dio supravodljivog magnetskog svitka

Ostali dijelovi supravodljivog magnetskog svitka prikazani su na slici 3.13.



**Slika 3.13** Dijelovi supravodljivog magnetskog svitka [1]

Glavna prednost ove tehnologije pohrane je vrlo brzo vrijeme odziva, odnosno tražena snaga je na raspolaganju gotovo trenutno. Osim toga sustav odlikuje visoka ukupna povratna učinkovitost (85% - 90%) i vrlo visoka snaga koja može biti na raspolaganju u kratkom vremenskom

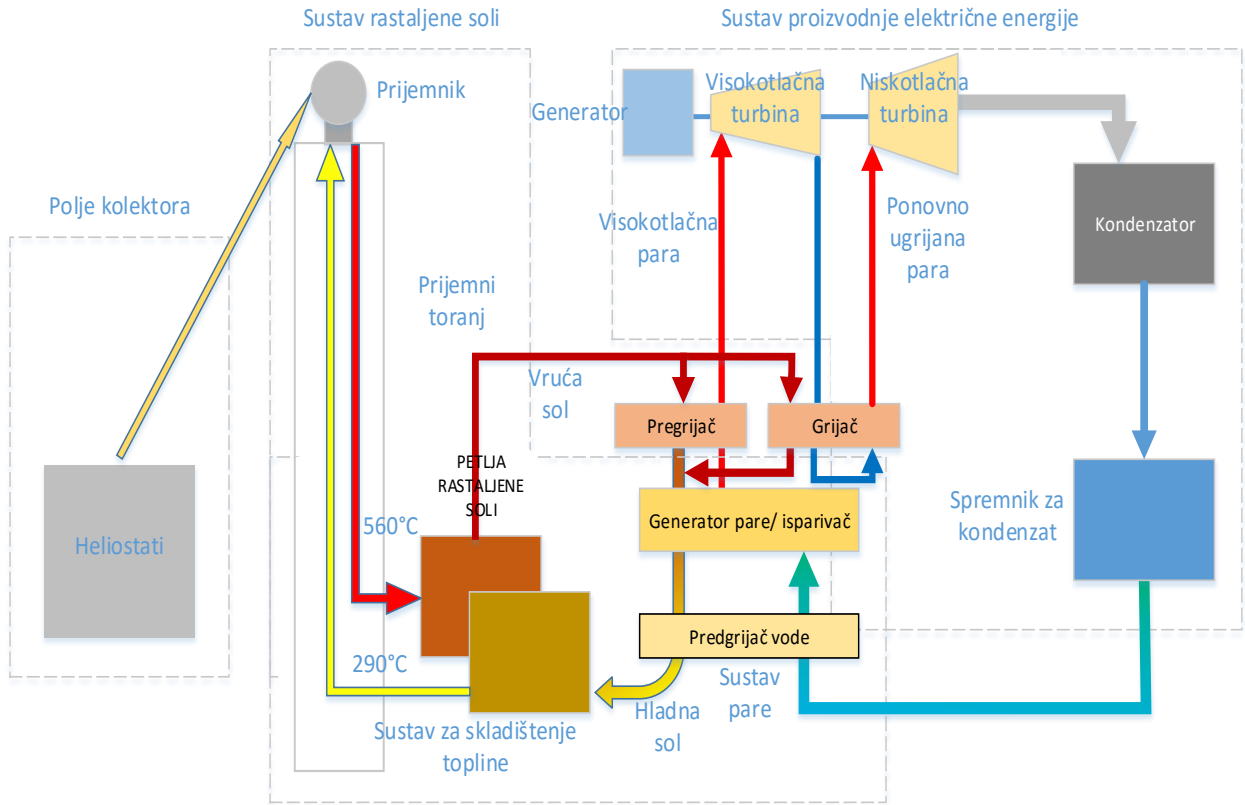
razdoblju [3]. Nema pokretnih dijelova u glavnom dijelu (svitak), a ukupna pouzdanost ovisi o rashladnom sustavu. U principu energija može biti pohranjena na neodređeno vrijeme sve dok radi sustav hlađenja, ali duže vrijeme skladištenja ograničeno je energetske potrebama rashladnog sustava.

Veliki sustavi supravodljivih magnetskih svitaka s više od 10 MW se uglavnom koriste u detektorima čestica za eksperimente fizike visoke energije i nuklearne fuzije [3]. Do sada je nekoliko malih sustava komercijalno dostupno: uglavnom se koriste za kontrolu kvalitete električne energije u proizvodnim pogonima.

### **3.5 Termički sustavi za pohranu električne energije**

#### **3.5.1 Pohrana topline**

Termički sustavi za pohranu su koncipirani na skladištenju energije u obliku topline. Postoje različiti pristupi za pohranu velike količine topline, jedan od najperspektivnijih je koncept promijene stanja materijala (engl. *phasechangingmaterials*(PCM)). Pojedini materijali sposobni su držati veliku količinu energije pri promjeni iz jednog stanja u drugo. Ovaj efekt poznat je kod kocke leda. Kada se kocka zagrijava ona ostaje na 0°C dok se potpuno ne otopi. Količina energije korištena za otapanje kocke leda je ekvivalentna iznosu energije koja je potrebna za grijanje vode na 80°C [1]. Isti učinak, ali uz veću gustoću energije, sadrže spremnici rastaljene soli. Blokova shema takvog sustava prikazana je na slici 3.14.



**Slika 3.14** Sustav pohrane topline na konceptu promjene stanja materijala

Budući da je toplina najniži oblik energije, nije se zapravo išlo sa idejom o pohrani energije u obliku topline, jer je najčešći način za proizvodnju električne energije parna turbina. To bi bilo neučinkovito: transformacija već proizvedene električne energije kroz pare ponovno u toplinu da bi na kraju ta toplina opet grijala paru parne turbine. Međutim, koncept je bitan za balansiranje solarne termoelektreane, jer ona koristi toplinu sunca tijekom dana da istovremeno proizvede električnu energiju i „napuni“ toplinske spremnike, što omogućuje generiranje energije tijekom noći.



**Slika 3.15** *Gemasolar u Sevili, solarna termoelektrana sa skladištima rastaljene soli [1]*

Gemasolar u Sevilli (slika 3.15) prva je elektrana komercijalnih razmjera koja koristi ovaj koncept. Sposobna je za proizvodnju 19,9 MW za 24 sata na dan, što je dovoljno za napajanje 25000 domaćinstava [1]. Solarna termoelektrana koja koristi koncentriranu solarnu energiju (CSP) ili parabolične udubine efikasna je samo u područjima s dovoljno sunčevog zračenja.

## 4 PODRUČJA PRIMJENE POJEDINIH TEHNOLOGIJA ZA POHRANU ELEKTRIČNE ENERGIJE

Od svih tehnologija za pohranu električne energije crpno-akumulacijske hidroelektrane su najšire usvojene. Od uvođenja prve takve elektrane oko 1904. godine u Švicarskoj, izgrađene su i u drugim dijelovima Europe, SAD-u, Kini, Japanu i mnogim drugim zemljama [5]. Rađene su najčešće u kombinaciji sa nuklearnom elektranom. Takva kombinacija omogućuje nuklearnoj elektrani da radi svojim maksimalnim kapacitetom kontinuirano, što je njen najefikasniji način rada. Električna energija proizvedena od strane nuklearne elektrane koja nije odmah potrebna, pohranjena je za otpremu tijekom razdoblja vršnog opterećenja. Nuklearne elektrane velikih su proizvodnih kapaciteta te samo crpno-akumulacijska hidroelektrana može osigurati dovoljno veliki kapacitet za pohranu potreban u tom slučaju. Također crpno-akumulacijska hidroelektrana vrlo dobro nadopunjuje obnovljive izvore energije. Naprimjer, pohranjena energija povećava ekonomsku vrijednost energije vjetra, jer se može pomaknuti da istisne veće troškove proizvodnje tijekom razdoblja opterećenja vršne potražnje.

Dvije zemlje sa najvećim kapacitetima crpno-akumulacijskih hidroelektrana su SAD i Japan. Svaka od njih ima oko 20 000 MW [5]. U oba slučaja većina elektrana povezana je sa nuklearnim razvojem. U SAD-u, na primjer, većina kapaciteta je sagrađena između 1970. i 1990. godine, kada je nuklearni rast bio najveći [5]. Tu je još 100 000 MW raspoređeno širom svijeta, što daje globalni kapacitet od oko 140 000 MW [5].

Pohrana komprimiranim zrakom ima kratku povijest razvoja. Najveća elektrana sa svojih 290 MW, još uvijek, je elektrana izgrađena 1978. godine na Hutfortu u Njemačkoj [5]. Služi za pohranu električne energije proizvedene iz nuklearne elektrane. Interes za ovu tehnologiju iz Njemačke je prebačen u SAD, gdje je EPRI (engl. *Electric Power Research Institute*) počinje promovirati u drugoj polovici 1980-ih [5]. Kao rezultat rada od strane „Alabama Electric Cooperative“ izgrađen je komercijalni projekt od 110 MW [5]. Elektrana je počela sa radom 1991. godine te radi još i danas [5]. Radi cikluse jednom ili dva puta dnevno te može pohraniti 2600 MWh energije [5]. Za vrijeme izgradnje elektrane u Alabami tehnologija je testirana i u Italiji, ali nijedna elektrana nije izgrađena. U novije vrijeme u SAD-u predložena je elektrana od 2700 MW, ali još nije izgrađena [5].

Pohrana energije vrlo je bitna i za unaprjeđenje električnih i hibridnih vozila. Najbitnija razmatranja pri odabiru baterije za električno ili hibridno vozilo su: gustoća snage, gustoća energije težina, volumen, životni ciklus, temperaturni opseg i utjecaj na okoliš. Litij-ionske

baterije vodeće su u industriji električnih i hibridnih vozila. Imaju potencijal isporučiti 400-450 Wh električne energije po kilogramu težine [6]. Osim prednosti velike izlazne energije i snage po jedinici mase u odnosu na ostale baterije, litij-ionske baterije imaju visoku energetska učinkovitost, nemaju posljedicu memorije te imaju relativno dug životni vijek.

Od svih punjivih baterija najpoznatije su olovno-kiselinske baterije. Koriste se u automobilima diljem svijeta te u manjim skladištima energije za domove i urede. Napredne olovno-kiselinske baterije su razvijene za pohranu energije većih razmjera, a najveća je za 10 MW elektranu u Kaliforniji [5]. Radne na sobnoj temperaturi i imaju tekući elektrolit. Izuzetno su teške te imaju slabu gustoću energije, ali nijedno od toga nije hendikep za stacionarnu primjenu. Također su jeftine i mogu se reciklirati više puta, ali potpuno pražnjenje ovih baterija može izazvati probleme.

Nikal-kadmij baterije imaju veću energetska gustoću i manju masu u odnosu na olovno kiselinske baterije. Također bolje rade pri niskim temperaturama, ali su obično skuplje. Ovaj tip baterije koristio se naširoko u prijenosnim računalima i mobilnim uređajima, ali su ih istisnule litij-ionske baterije. Najveća nikal-kadmij baterija izgrađena je na Aljasci 2003. Godine [5]. 40 MW jedinica zauzima zgradu veličine nogometnog igrališta te se sastoji od 13 760 pojedinačnih stanica [5].

Natrij-sumpor baterije su visoko-temperaturne baterije. Radne na temperaturi 300°C i sadrže tekući natrij koji će eksplodirati pri kontaktu sa vodom. Sigurnost je glavni problem kod ovih baterija. Međutim, vrlo visoka gustoća energije ove baterije čini atraktivnim, posebno za primjenu u automobilima. Za komercijalne primjene razvija se u Japanu. Demonstracija projekata i rani komercijalni projekti su veličine 500 kW do 6 MW [5]. Većina ih je u Japanu, ali postoji i mali dio u SAD-u.

**Tablica 4.1** Područja primjene pojedinih tehnologija[2]

<b>Tehnologija</b>	<b>Osnovna primjena</b>	<b>Što trenutno znamo</b>	<b>Izazovi</b>
Komprimirani zrak	-Upravljanje energijom -Rezerva -Integracija obnovljivih izvora	-Tehnologija osnovana i u funkciji od 1970. godine	-Geografski ograničena -Niža učinkovitost zbog povratne pretvorbe -Sporije vrijeme odziva u odnosu na zamašnjake i baterije -Utjecaj na okoliš
Crpno-akumulacijske hidroelektrane	-Upravljanje energijom -Rezerva -Regulacija putem promjenjivih brzina crpke	-Razvijena tehnologija -Trenutno najisplativiji oblik pohrane	-Geografski ograničena -Lokacija postrojenja -Utjecaj na okoliš -Visoki ukupni troškovi projekta
Zamašnjaci	-Izravnavanje opterećenja -Regulacija frekvencije -Peglanje vrhova -Prijelazna stabilnost	-Modularna tehnologija -Rastući potencijal na ljestvici korisnosti -Dug životni ciklus -Visoka vršna snaga bez pregrijavanja -Brza reakcija -Visoka povratna učinkovitost	-Ograničenja zbog vlačne čvrstoće rotora -Ograničeno vrijeme za pohranu energije zbog visokih gubitaka uslijed trenja
Olovno-kiselinske baterije	-Regulacija -Stabilizacija mreže	-Niska cijena -Sadržaj za reciklažu -Dobar životni vijek baterije	-Ograničena dubina pražnjenja -Niska gustoća energije -Velike dimenzije -Korozija elektrode

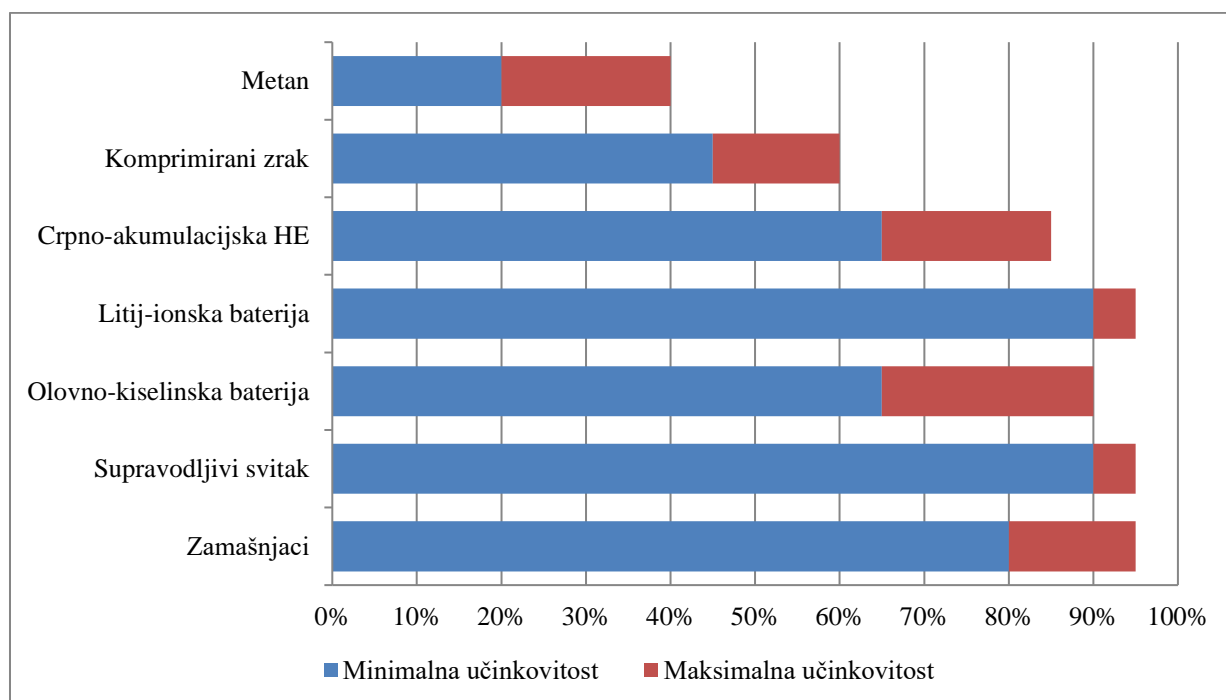
<b>Tehnologija</b>	<b>Osnovna primjena</b>	<b>Što trenutno znamo</b>	<b>Izazovi</b>
			ograničava korisni vijek
Natrij-sumpor baterije	-Kvaliteta napajanja -Obnovljivi izvor -Integracija	-Visoka gustoća energije -Dug ciklus pražnjenja -Brz odziv -Dug životni vijek -Dobar potencijal na ljestvici korisnosti	-Radna temperatura je između 250°C i 300°C -Korozija i krhke staklene brtve
Litij-ionske baterije	-Kvaliteta napajanja -Regulacija frekvencije	-Visoka gustoća energije -Dobar životni ciklus -Visoka učinkovitost punjenja/pražnjenja	-Visoki troškovi proizvodnje -Iznimno osjetljiv na više temperature i preopterećenje -Netolerancija na duboka pražnjenja
Protočne baterije	-Peglanje vrhova -Vremenski pomak -Regulacija frekvencije -Kvaliteta napajanja	-Sposobnost obavljanja velikog broja ciklusa pražnjenja -Niža učinkovitost punjenja/pražnjenja -Vrlo dug životni vijek	-Tehnologija u razvoju, nije zrela za razvoj komercijalnih razmjera -Komplicirana konstrukcija -Niska gustoća energije
Supravodljivi magnetski svitak	-Kvaliteta napajanja -Regulacija frekvencije	-Najviša povratna učinkovitost pražnjenja	-Niska gustoća energije -Previsoki troškovi materijala i proizvodnje
Ultra kondenzator	-Kvaliteta napajanja -Regulacija	-Vrlo dug životni vijek	-Trenutno previsoki troškovi



Tehnologija	Osnovna primjena	Što trenutno znamo	Izazovi
	frekvencije	-Visoko reverzibilna -Brzo pražnjenje	
Termokemijska pohrana energije	-Regulacija -Stabilizacija mreže	-Ekstremno visoka gustoća energije	-Trenutno previsoki troškovi

## 4.1 Izravna usporedba

Nekoliko tehnologija poput zamašnjaka ili baterija imaju veliku prednost zbog dobre učinkovitosti.



**Slika 4.1** Usporedba efikasnosti pojedinih tehnologija [1]

Učinkovitost sama ipak nije pokazatelj da pojedina tehnologija odgovara sustavu jer ulogu ima i nedostatak potrebnih skladišnih kapaciteta. Odnosno pojedina tehnologija ili je preskupa ili zahtijeva velike količine resursa.

**Tablica 4.2** Usporedba gubitaka energije pojedinih tehnologija [1]

Zamašnjaci	Supravodljivi svitak	Olovno-kiselinska baterija	Litij-ionska baterija	Crpno-akumulacijska HE	Komprimirani zrak	Metan
3-20% po satu	10-12% po danu	5% po mjesecu	5% po godini	0-0,5% po danu	0-10% po danu	0-1% Po danu

Iz tablice 4.2 vidljivo je da većina tehnologija ima minimalan gubitak energije kroz duže vrijeme. Zamašnjaci i supravodljivi svitak imaju najveće gubitke. Treba napomenuti da kod

komprimiranog zraka što je duže energija pohranjena to je vjerojatnije da će se gubici energije približiti 10%. Razlog tomu su toplinski gubici u spremniku.

**Tablica 4.3** Cijena pojedinih tehnologija [1]

<b>Tehnologija</b>	<b>Životni ciklus</b>	<b>Specifični investicijski troškovi / proizvedenom kWh</b>
Zamašnjaci	20 godina	1000 – 5000 €
Supravodljivi svitak	1000000 ciklusa	30000 – 2000000 €
Olovno-kiselinska baterija	1000 – 2000 ciklusa	25 – 250 €
Litij-ionska baterija	500 – 3000 ciklusa ili 5 godina	800 – 1500 €
Crpno-akumulacijska HE	-	100 – 500 €
Komprimirani zrak	-	40 – 100 €

Neki troškovi, kao i životni ciklusi su procijenjeni, jer tehnologije još nisu komercijalne. Životni ciklusi crpno-akumulacijskih hidroelektrana i komprimiranog zraka nisu navedeni jer su to spremišta velikih razmjera. Grade se na specifičnim lokacijama i planiraju se koristiti nekoliko desetljeća. Pojedine komponente kao što su turbina i crpka u slučaju kvara jednostavno se zamijene ili nadograde.

## **4.2 Primjeri pohrane električne energije**

Umjesto da se na pohranu energije gleda kao na pojedinačnu tehnologiju, mora ju se promatrati kao dio optimiziranog ekosustava tehnologija koje podržavaju jedna drugu te tako stvaraju pouzdanu električnu mrežu. Iz sljedećih nekoliko primjera vidljiva je korist pohrane električne energije u sustavu.

### **4.2.1 Primjer 1**

Duke Energy Rankin projekt skladištenja energije (prikazan na slici 4.1) pokazao je da sustav skladištenja u kombinaciji sa mrežno-interaktivnim algoritmom može pomoći pri apsorpciji distribuiranog solarnog sustava te na taj način smanjiti troškove. Ovaj sustav baterija, koji se sastoji od 402/282 kWh natrij-nikal-klorid baterije, instaliran unutar trafostanice nalazi se više od četiri kilometra udaljen od velike distribucijsko povezane solarne instalacije [7]. Kružnom

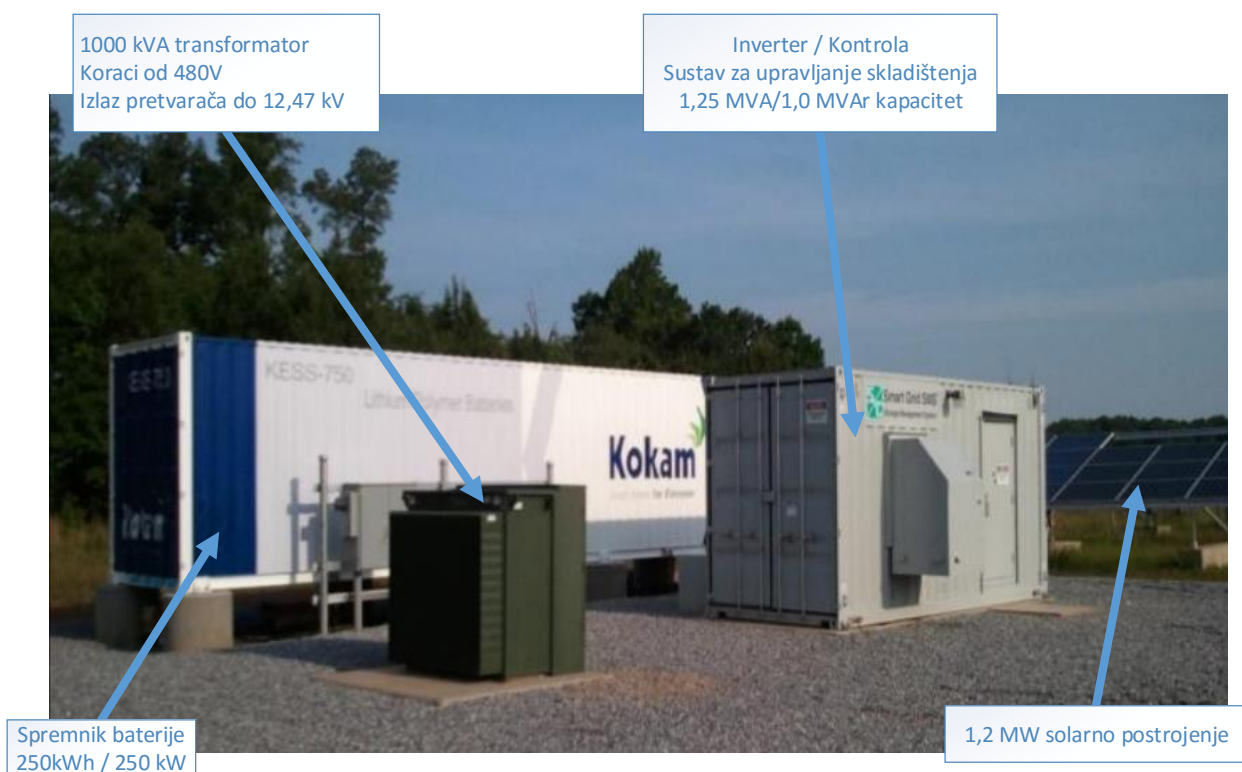
telemetrijom uz pomoć releja i druge opreme u trafostanici, algoritam baterije prepoznaje nepoželjno visoke stope promjene u krugu opterećenja koje su uzrokovane naglim povećanjem ili smanjenjem solarnog izlaza. Algoritam zatim izdaje naredbe punjenja i pražnjenja sustavu za pohranu energije, kako bi suzbio nepoželjna ljučanja snage. Oprema trafostanice je na taj način zaštićena od brzih kolebanja opterećenja. To omogućava zaštitnoj opremi trafostanice rad pod izvornim dizajnerskim pretpostavkama te sprječava opremu za monitoring napona trafostanice na nepotrebno reagiranje prilikom kratkotrajnih promjena opterećenja uzrokovane na solarnoj strani. Zbog smještenosti baterije u trafostanici, potreba za izravnom telemetrijom solarnog izlaza te mogućnosti odluke o otpremi energije iz baterije na lokalnoj razini, bez dalekometnih podataka natrag, ovaj sustav za pohranu energije pokazuje kako skladištenje energije ima vrijednost kada je optimizirano unutar mreže ekosustava, korištenjem distribuirane inteligencije.



**Slika 4.2** Rankin sustav pohrane energije, Mount Holly, Sjeverna Karolina [8]

#### 4.2.2 Primjer 2

Marshall sistem pohrane električne energije (prikazan na slici 4.2) dokazuje sposobnost stvaranja vrijednosti energije. Ovaj sustav, koji se sastoji od 250/250 kWh litij polimer baterije, priključen na distribucijsku mrežu, bio je prvenstveno namijenjen za pomjeranje električne energije u vremenu. Baterija 250 kW, trajanja 3h koristise za peglanje vrhova distribucijskog i prijenosnog kruga, optimiziranje generiranja energije te tako stvara uštedu goriva ili smanjenu emisiju ugljika [7]. To sve je postignuto tako što je baterija spojena na dovod distribucije. Sposobnost baterije za punjenje i pražnjenje kako bi ostvarila energetska pomjeranje je jasno, ali izazov je prikupljanje i korištenje podataka iz cijele mreže kako bi se odredilo optimalno pomjeranje energije u bilo kojem trenutku. To znači miješanje ekonomskih i operativnih podataka koje je potrebno optimizirati. Sustav se koristi, osim za pomjeranje energije u vremenu, za izgladivanje izlaza iz susjedne solarne elektrane te na taj način pokazuje koncept grupiranja.



**Slika 4.3** Marshal sustav pohrane energije, Sherrills Ford, Sjeverna Karolina [9]

#### 4.2.3 Primjer 3

Projekt „Community sustav pohrane električne energije“ (prikazan na slici 4.3) naglašava kako vrijednost sustava za pohranu ovisi o lokaciji sustava. Kada se sustav nalazi na „rubu mreže“ ili u blizini potrošača, sustav za pohranu energije predstavlja jedinstvenu vrijednost, upravo zbog svoje blizine. Dvije instalirane jedinice 25/25 kWh pokazale su da koriste i mreži i potrošačima

[7]. Te vrijednosti su energetska pomjeranje (koristi mreži), automatska regulacija napona (koristi mreži), sposobnost pružanja potpomoći prilikom ispada mreže (koristi potrošačima) i sposobnost ublažavanja brzih fluktuacija snage uzrokovane malim solarnim elektranama na strani potrošača (koristi mreži).



**Slika 4.4** Sustav pohrane energije sa transformatorom, Charlotte, Sjeverna Karolina [9]

## 5 OPTIMIZIACIJA SAMOSTALNOG FOTONAPONSKOG SUSTAVA S POHRANOM ELEKTRIČNE ENERGIJE

Veličina i performanse fotonaponskog sustava ovise o varijablama kao što su energija sunčevog zračenja i temperatura okoliša te stoga, za optimizaciju fotonaponskog sustava moraju se izvršiti detaljna mjerenja tih varijabli. Osim toga, model fotonaponskog sustava ima značajan utjecaj na rezultate dimenzioniranja tako što odražava učinkovitost, a samim time i pouzdanost sustava, što je jedno od najvažnijih ograničenja pri dimenzioniranju.

Samostalni fotonaponski sustav je električni sustav koji se sastoji od jednog ili više fotonaponskog modula, vodiča, električnih komponenti te jednog ili više tereta. Takav sustav idealan je za udaljena ruralna područja i primjenu gdje drugi izvori energije nisu dostupni ili su nepraktični. U tom slučaju često je isplativije instalirati jedan samostalni fotonaponski sustav, nego platiti troškove elektroprivredi za proširenje vodova i kabela do željene lokacije. Tipični samostalni sustav sadrži jednu ili više metoda proizvodnje energije, skladištenje energije i regulaciju. Izlaz baterije je istosmjerna struja niskog napona, što se koristi za rasvjetu te neke DC uređaje. Pretvarač se koristi za generiranje izmjeničnog napona te tako omogućuje napajanje AC uređaja. Električna energija proizvedena iz fotonaponskih panela ne može se uvijek koristiti izravno. Kako opterećenje nije uvijek jednako proizvodnji fotonaponskih panela koriste se baterije. Primarne funkcije baterije za pohranu kod samostalnog naponskog sustava su:

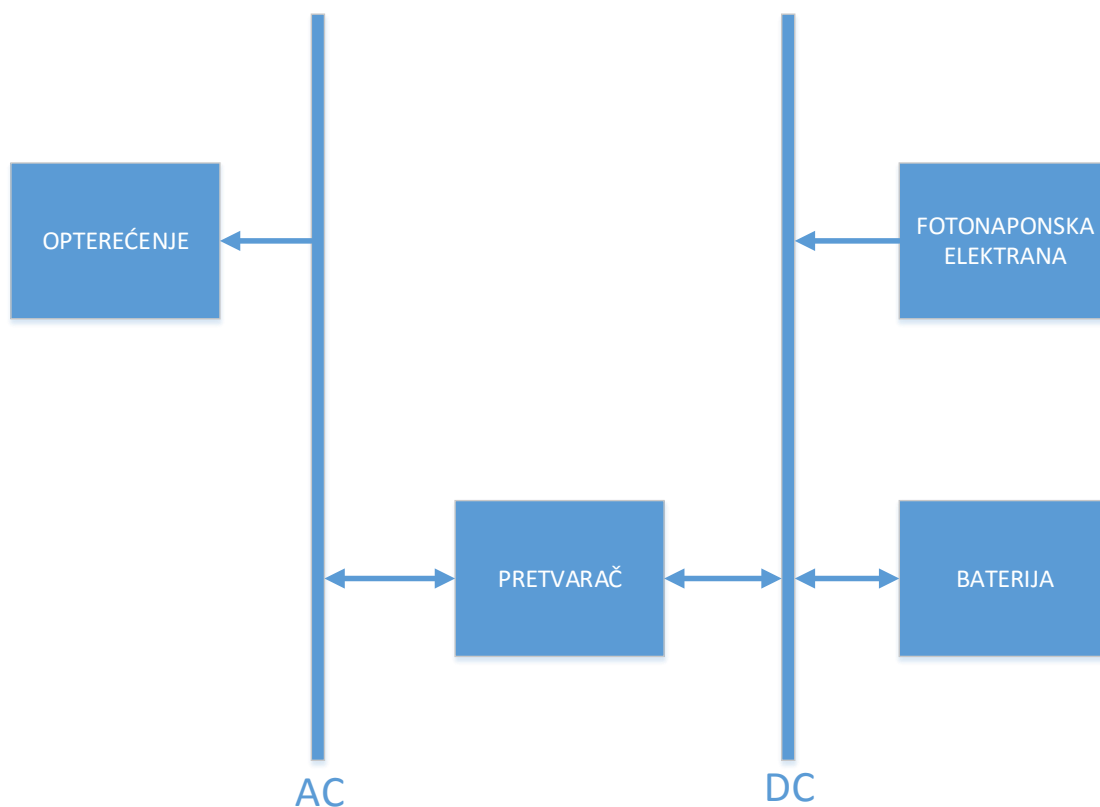
- pohranjuje višak energije te nadoknađuje manjak kada je potrebno,
- osigurava stabilan napon i struju za uklanjanje prijelaznih pojava,
- osigurava udarnu struju opterećenja kada je potrebno.

Iako su glavne komponente i najveći trošak sustava fotonaponski moduli, obično je potrebno i nekoliko drugih komponenti:

- baterije – pohranjuju solarnu energiju za korištenje tijekom noći ili u nuždi i tijekom dana,
- regulator punjenja – regulira i kontrolira izlaz fotonaponskih modula kako bi spriječilo prepunjenost (ili nedopuštenu ispražnjenost) baterija. Regulator punjenja nije obavezan kod samostalnih fotonaponskih sustava, ali dobro ga je ugraditi iz sigurnosnih razloga,

- osigurači i prekidači – oni omogućuju da fotonaponska instalacija bude zaštićena od slučajnog kratkog spoja te da se sustav „ugasi“ kada nije potreban, jer tako štedi energiju i produžuje životni vijek baterije,
- pretvarač – je još jedan neobavezna komponenta u samostalnom fotonaponskom sustavu. Koriste se za pretvaranje istosmjerne u izmjeničnu struju,
- električni vodovi – vodovi moraju biti pravilno dimenzionirani.

Blok shema samostalnog fotonaponskog sustava prikazana je na slici 5.1.



**Slika 5.1** Blok shema samostalnog fotonaponskog sustava

Najčešća metodologija optimizacije sustava općenito, počinje definiranjem veličine sustava te zatim dobavljanjem vremenske serije podataka za solarnu energiju, temperaturu zraka i jačinu vjetra (u slučaju hibridnog fotonapon/vjetar sustava). Zatim, temeljeno na prirodi fotonaponskog sustava (samostalni, sa mrežom ili hibridni), izračun kapaciteta potrebnog napajanja elektroenergetskog sustava (baterije, vjetro turbine, generator) vrši se na osnovu indeksa dostupnosti sustava.

Samostalni fotonaponski sustavi naširoko se koriste u izoliranim područjima koja nemaju pristup električnoj mreži. Ovi sustavi dokazuju svoju isplativost u odnosu na konvencionalne samostalne sustave napajanja kao što su dizel generatori, posebno u izoliranim područjima zbog poteškoća

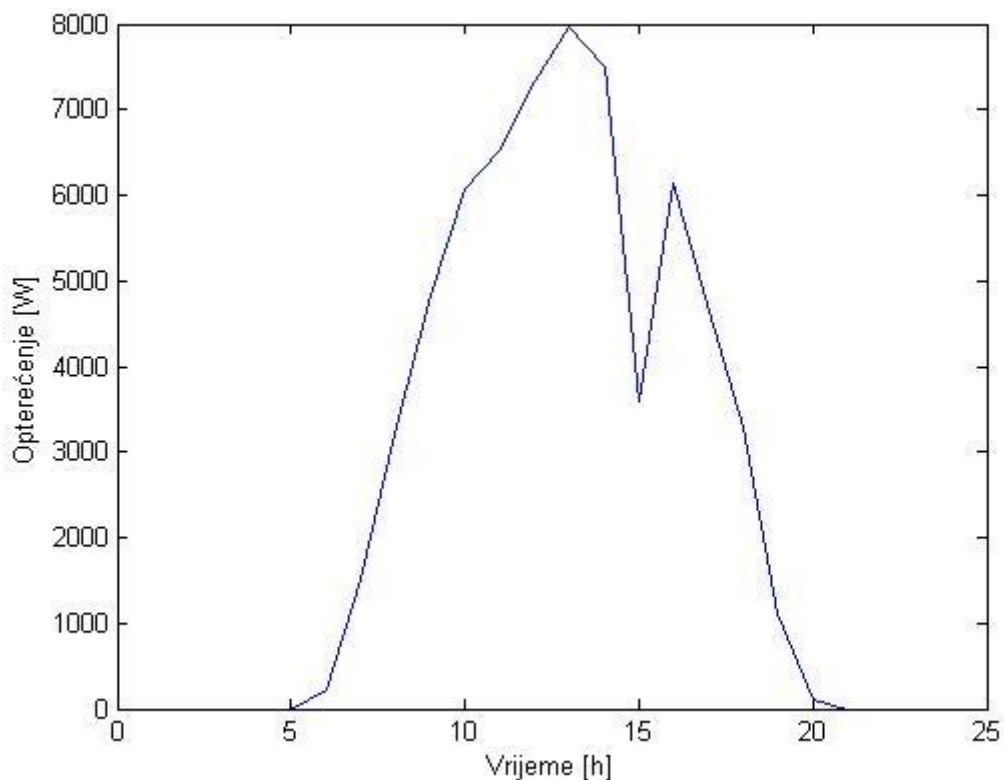
pristupa i troškova prijevoza. Međutim, fotonaponski sustav mora biti dimenzioniran tako da se pokrije potrebno opterećenje sa definiranom razinom sigurnosti. Postoje tri glavne metode dimenzioniranja, a to su, intuitivna, numerička (simulacija) te analitička metoda [10].

## 5.1 Opis modela

Za relevantan rezultat vrlo je bitno uzeti realne podatke kako bi se simulirani slučaj što više približio stvarnom slučaju.

### 5.1.1 Opterećenje

Podaci o opterećenju sustava su realni podaci potrošnje Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Mjerenje potrošnje vršeno je u Laboratoriju za obnovljive izvore energije. Na sljedećim grafovima prikazani su dnevna i tjedna potrošnja. Godišnja potrošnja nije prikazana zbog nepreglednosti grafa.

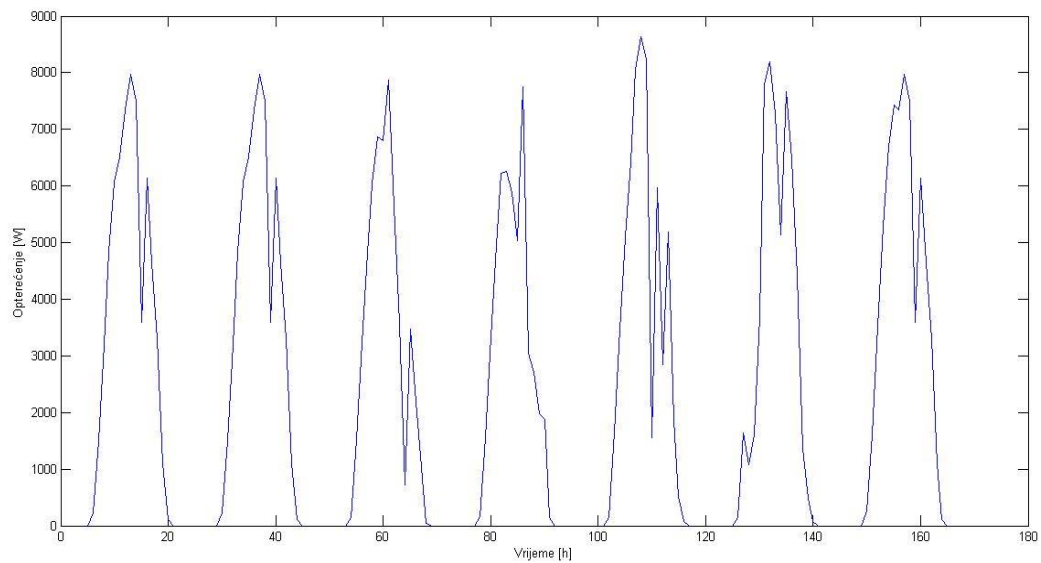


**Slika 5.2** Dnevno opterećenje

Na slici 5.2 može se uočiti kako nema opterećenja preko noći, što je dobar slučaj jer je i proizvodnja fotonaponskih modula samo preko dana dok ima sunčevog zračenja. To znači da će



baterije morati nadoknaditi samo mali dio opterećenja (ujutro i predvečer), što uvelike smanjuje broj baterija i cijenu čitavog sustava.



**Slika 5.3** Tjedno opterećenje

Na slici 5.3 jasno je vidljivo da je opterećenje kroz čitav tjedan tijekom sunčanih sati. Slučaj je isti za čitavu godinu.

### 5.1.2 Proizvodnja

Podaci o sunčevom zračenju za područje Osijeka su preuzeti sa PVGIS-a (engl. *Photovoltaic geographical information system*) [11]. Na slici 5.4 prikazano je sučelje PVGIS internet stranice.

Slika 5.4 PV GIS

PVGIS računa sunčevo zračenje na željenoj lokaciji u željeno vrijeme godine (mjesec). Za simulaciju je korišten nagib panela  $35^\circ$ , s azimutom  $0^\circ$ . Bitno je napomenuti da je rezultat dnevne radijacije mjesečni prosjek, odnosno pri simulaciji, svaki dan čitav mjesec imat će jednaku krivulju radijacije. Mjerenja na PVGIS-u rađena su u razmaku od 15 minuta. Za vrijednost sunčevog zračenja svakog sata, računat je prosjek od 4 mjerenja. Kako se vidi na slici 5.5, vrijednost sunčevog zračenja (za mjesec siječanj) u 7 sati je  $0\text{W}$ ; u 8 sati je  $48,25\text{W}$ ; u 9 sati je  $141,5\text{W}$  itd.

Results for: January

Solar radiation database used: PVGIS-CMSAF

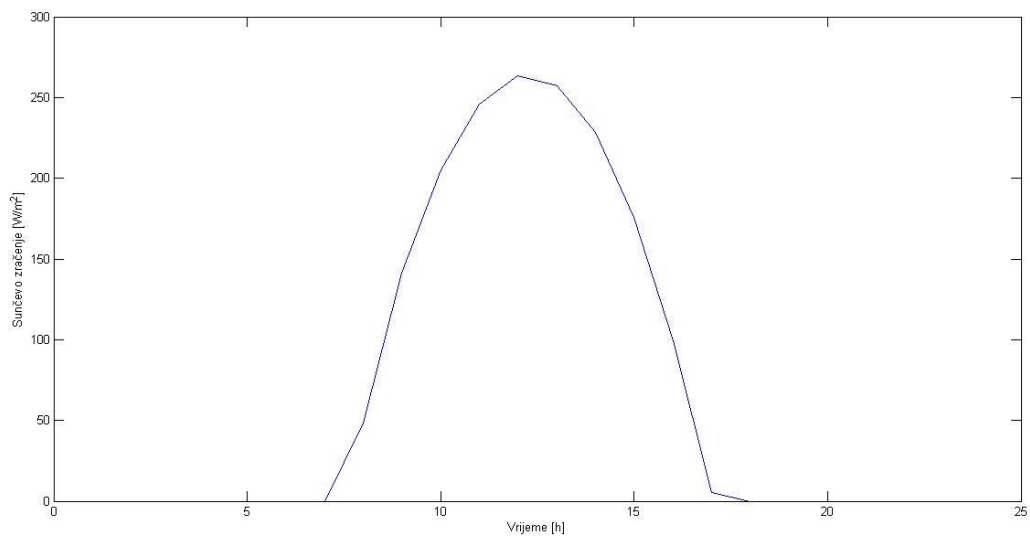
Inclination of plane: 35 deg.

Orientation (azimuth) of plane: 0 deg.

Time	$G$	$G_d$	$G_c$	$DNI$	$DNI_c$	$A$	$A_d$	$A_c$	$T_d$
06:22	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.5
06:37	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.3
06:52	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.1
07:07	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.9
07:22	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.6
07:37	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.4
07:52	41	25	103	52	268	75	22	302	-0.1
08:07	64	37	171	73	378	112	37	443	0.2
08:22	88	49	246	92	476	149	54	576	0.5
08:37	113	61	325	107	558	174	62	670	0.8
08:52	133	69	392	120	624	193	68	741	1.1
09:07	151	77	457	130	676	209	73	798	1.4
09:22	169	83	517	138	719	222	78	844	1.7
09:37	185	89	573	145	754	234	82	881	2.0
09:52	199	95	625	151	783	244	86	912	2.2
10:07	212	99	672	155	807	252	90	938	2.5
10:22	224	103	714	159	827	260	93	959	2.7
10:37	234	107	752	162	843	266	96	976	2.9
10:52	243	109	784	165	857	271	98	990	3.1
11:07	250	112	812	167	867	275	100	1000	3.3
11:22	256	113	834	169	876	278	101	1010	3.4
11:37	260	115	850	170	882	280	102	1020	3.5

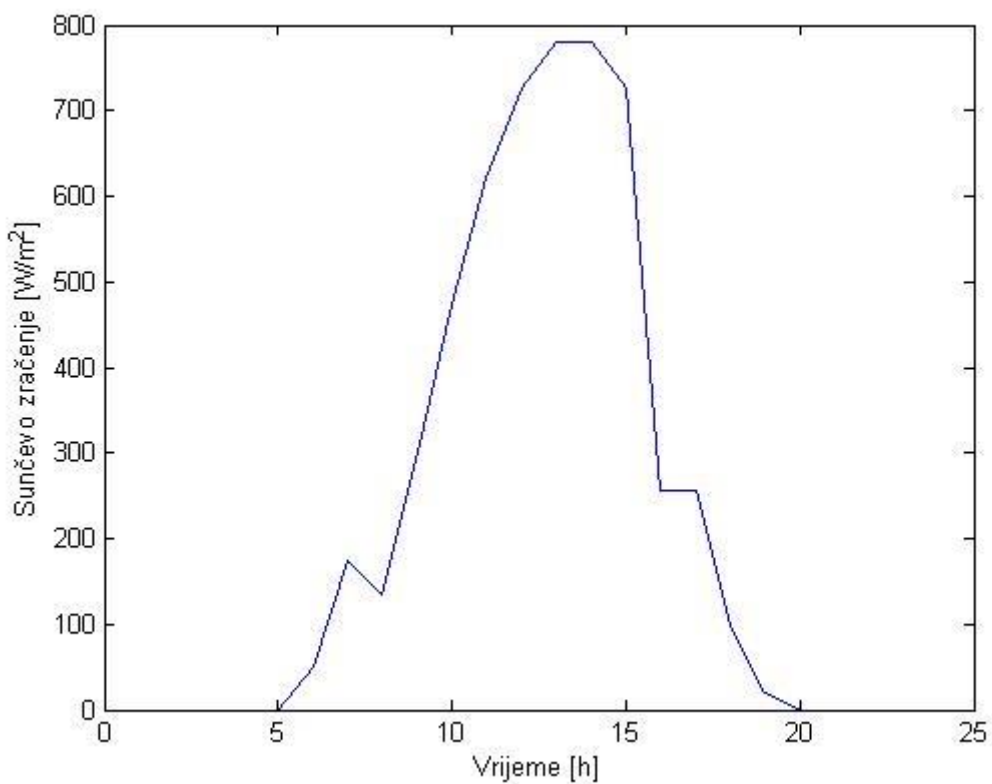
**Slika 5.5** Satni prosjek prema PVGIS-u

Na slici 5.5 veličina  $G$  predstavlja globalnu radijaciju na nepomičnom panelu. Veličina  $G_c$  predstavlja globalnu radijaciju na nepomičnom panelu uz vedro nebo. Ako usporedimo te dvije veličine jasno je vidljivo da radijacija može biti dosta veća od prosječne  $G$  koja je uzeta u obzir pri simulaciji. Na slikama 5.6 i 5.7 prikazano je dnevno sunčevo zračenje za mjesec siječanj i kolovoz.



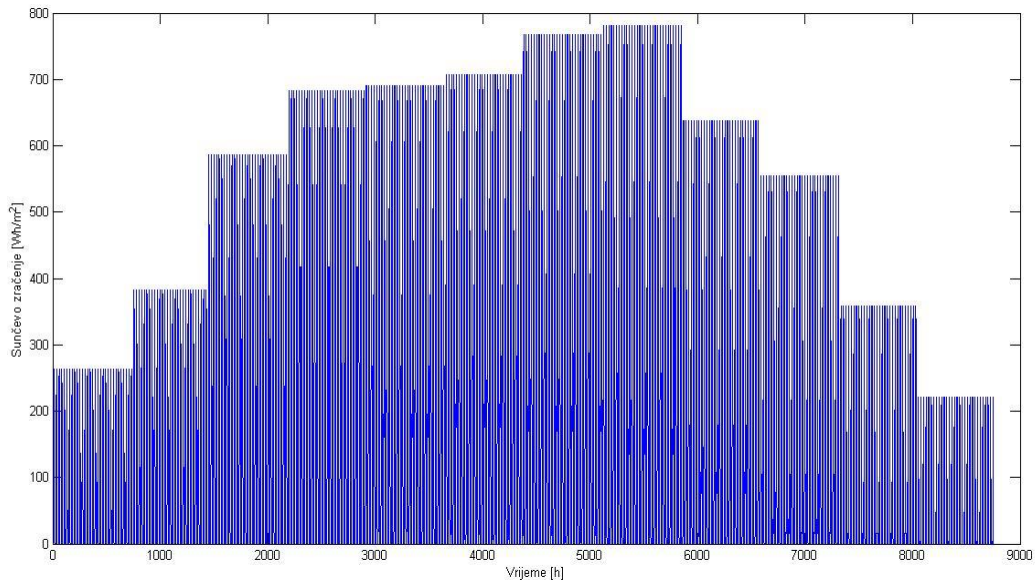
**Slika 5.6** Sunčevno zračenje za mjesec siječanj

Na slici 5.6 prikazano je dnevno sunčevo zračenje prosječnog dana u mjesecu siječnju. Razlika između sunčevog zračenja za mjesec siječanj i kolovoz jasno je vidljiva. U kolovozu zračenje je jače za oko 500 W/m<sup>2</sup>.



**Slika 5.7** Sunčevno zračenje za mjesec kolovoz

Na slici 5.8 prikazano je sunčevo zračenje kroz čitavu godinu. Može se uočiti kako su prijelazi iz mjeseca u mjesec nagli (stepenica), a to je iz razloga jer je u obzir uzeto prosječno dnevno zračenje za pojedini mjesec.



**Slika 5.8** Sunčevo zračenje kroz godinu dana

Prema slici iznad, najjače sunčevo zračenje je u kolovozu, a najslabije u prosincu.

### 5.1.3 Fotonaponski modul

Fotonaponski modul korišten pri simulaciji je monokristalni modul BISOL BMO 250. Njegove karakteristike prikazane su u tablici 5.1.

**Tablica 5.1** Karakteristike fotonaponskog modula BISOL BMO 250

Karakteristike FN modula		
NOCT=	44	[°C]
$\alpha$ =	0,045	[A/°C]
$\eta_M$ =	15,3	[%]
Dimenzije modula		
Dužina=	1,6949	[m]
Širina=	0,991	[m]
Površina=	1,6796459	[m <sup>2</sup> ]

Gdje NOCT (engl. *nominal operating cell temperature*) predstavlja nazivnu radnu temperaturu ćelije,  $\alpha$  je strujni temperaturni koeficijent, a  $\eta_M$  je učinkovitost modula. Snaga koju daje jedan modul računa se prema sljedećoj formuli:

$$P_{1MDC} = S \cdot A_M \cdot \eta_M \quad (5-1)$$

$S$  – sunčevo zračenje [ $W/m^2$ ]

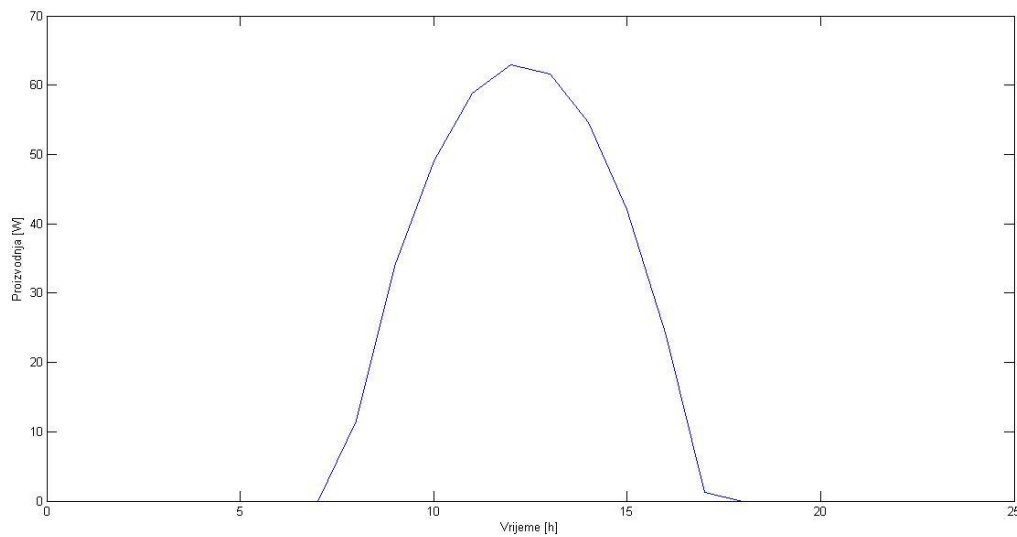
$A_M$  – površina modula

$\eta_M$  - učinkovitost modula.

Tako izračunata snaga modula je snaga na samom izlazu iz modula, a za računanje snage na izmjeničnoj strani sustava mora se uzeti u obzir učinkovitost pretvarača te učinkovitost vodiča:

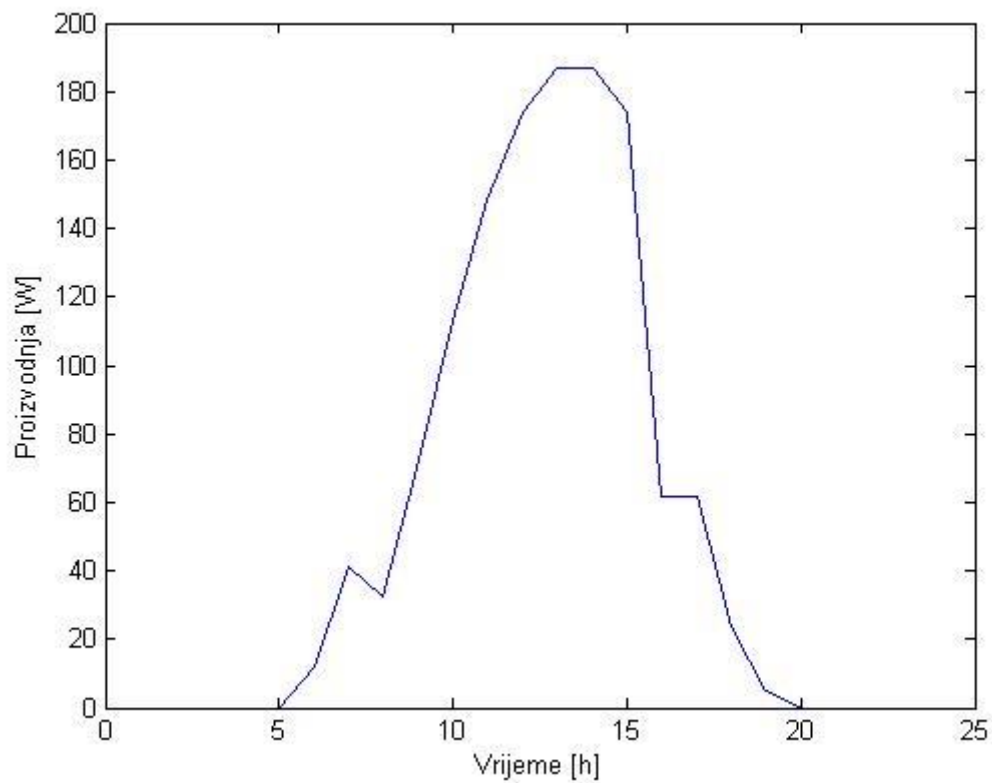
$$P_{1MAC} = P_{1MDC} \cdot \eta_{PRE} \cdot \eta_{VOD} \quad (5-2)$$

Na slici 5.9 prikazana je proizvodnja jednog modula u mjesecu siječnju.



**Slika 5.9** Proizvodnja jednog modula u siječnju

Proizvodnja modula u kolovozu (prikazana je na slici 5.10) skoro tri puta je veća u odnosu na proizvodnju u siječnju. Jedini razlog tomu je razlika u sunčevom zračenju.

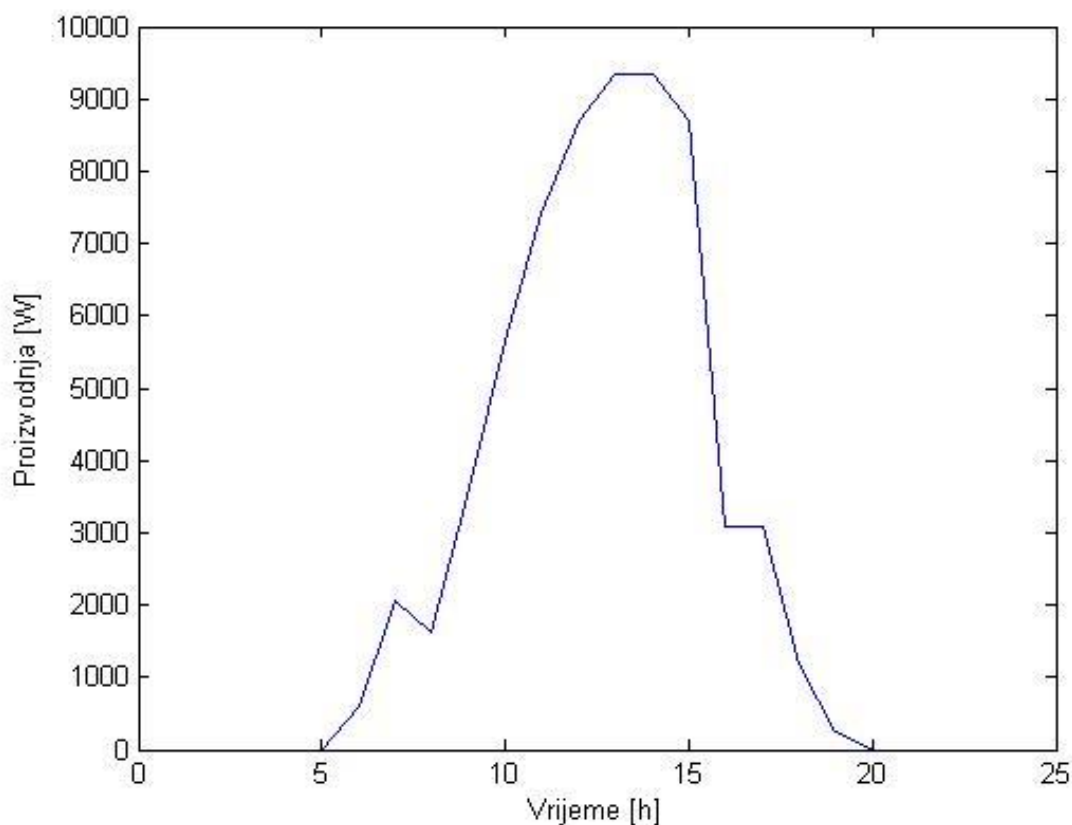


**Slika 5.10** *Proizvodnja jednog modula u kolovozu*

Ukupna proizvodnja fotonaponske elektrane dobije se tako što se proizvodnja jednog modula uveća za toliko puta koliko ima modula ukupno:

$$P_{UK} = n \cdot P_{1MAC} \quad (5-3)$$

Za primjer 50 modula i intenzitet sunčevog zračenja prosječnog dana mjeseca kolovoza proizvodnja fotonaponske elektrane u 24 sata prikazana je na slici 5.11.



Slika 5.11 Proizvodnja pedeset modula u kolovozu

## 5.2 Opis optimizacije

Ideja za optimizaciju je izračun vjerojatnosti deficita snage (engl. *loss of load probability (LOLP)*) dimenzioniranog fotonaponskog sustava prema sljedećoj formuli:

$$LOLP = \frac{\text{deficit snage}}{\text{ukupno opterećenje}} \quad (5-4)$$

Vjerojatnost deficita snage kreće se od nula do jedan. Što je koeficijent bliže nuli, to je veća vjerojatnost da deficita neće biti, odnosno ako je vjerojatnost deficita snage jednaka nuli, to znači da deficita uopće ni u jednom trenutku nema, što znači da sustav čitavo vrijeme može zadovoljiti sve zahtjeve opterećenja. Sa druge strane, ako je deficit jednak jedan, to znači da sustav ni u jednom trenutku ne može zadovoljiti potrebe opterećenja.

Za primjer, ako je vjerojatnost deficita snage manja od 1% za 50 panela i 20 baterija, bit će manja od 1% i za 60 panela i 30 baterija, ali je u drugom slučaju investicija u sustav puno veća.

Ideja je da se izračuna cijena svih kombinacija broja panela i broja baterija koje zadovoljavaju zadanu željenu vjerojatnost deficita snage:



$$Ukupna\ cijena = n \cdot C_M + m \cdot C_B \quad (5-5)$$

Gdje je  $n$  broj modula,  $C_M$  cijena jednog modula,  $m$  broj baterija te  $C_B$  cijena jedne baterije. Upravo najniža ukupna cijena sustava je cijena optimalne kombinacije broja panela i broja baterija.

Naravno, pri računu se mora u obzir uzeti ograničenje minimalnog i maksimalnog stanja baterije. U simulaciji je korištena baterija proizvođača „Victron Energy“, model GEL 12V/220Ah prikazana na slici 5.12. To je hermetički zatvorena olovna baterija sa elektrolitom u obliku gela. Životni ciklus baterije je [12]:

- 500 ciklusa sa 80% pražnjenja
- 750 ciklusa sa 50% pražnjenja
- 1800 ciklusa sa 30% pražnjenja.

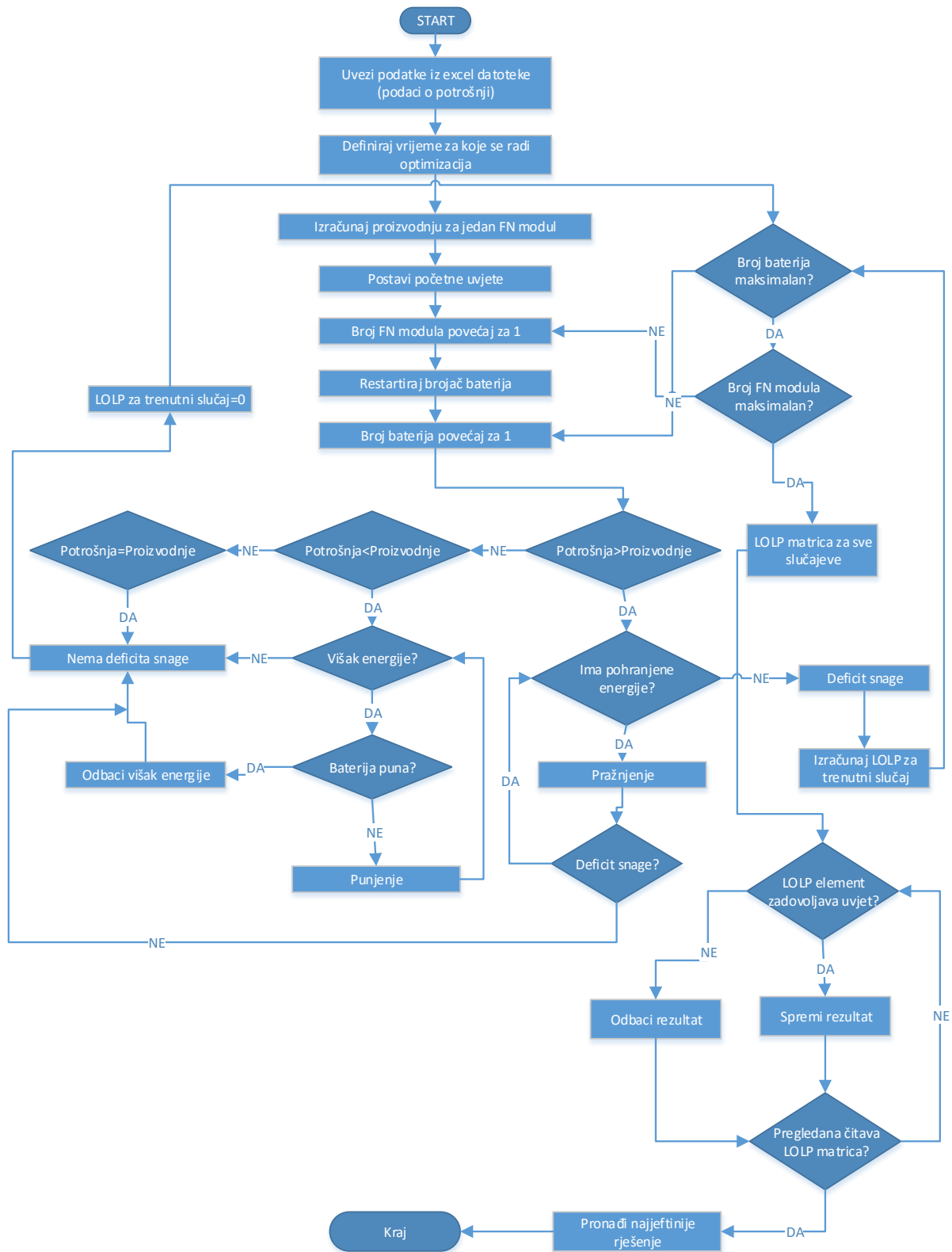
Pri simulaciji u obzir je uzet slučaj sa dozvoljenom ispražnjenosti od 80%.



**Slika 5.12** Olovno-kiselinska baterija korištena pri simulaciji[13]

## 5.2.1 Blok dijagram

Na slici 5.13 prikazan je dijagram toka izvođenja programa, odnosno grafički je prikazana uzročno-posljedična veza u programu.



Slika 5.13 Blok dijagram

Na samom početku programa podaci iz Excel datoteke uvezeni su u Matlab. Ti podaci su: podaci o opterećenju i sunčevom zračenju, karakteristike baterije i fotonaponskog modula te cijene i uvjete za simulaciju. Uvjeti za simulaciju su maksimalni broj modula i maksimalni broj baterija za koji će Matlab računati kombinaciju kako bi došao do optimalnog rješenja te željena vjerojatnost deficita snage. Nakon toga, definira se željeno vrijeme simulacije (sati, dani, mjesec, godina).

Matlab izračuna proizvodnju jednog modula te postavi početno stanje baterije (napunjena maksimalno). Zatim, za sve kombinacije broja fotonaponskih modula i broja baterija, u svakom satu, računa razliku između proizvodnje i potrošnje. Ukoliko je proizvodnja veća od potrošnje, nema deficita snage, što znači da sustav može samostalno raditi.

Ukoliko je proizvodnja manja od potrošnje te baterija ne može nadoknaditi manjak energije, postoji deficit snage. Uz pomoć tog deficita računa se vjerojatnost deficita snage formulom (5-4). Matlab sprema rezultat ako je ta vjerojatnost manja od željene zadane vjerojatnosti (npr. 1%), a ako je veća od zadane, odbaci rješenje.

Na kraju programa, kada provjeri vjerojatnost deficita za sve moguće kombinacije, preko formule (5-5) izabere rješenje s minimalnim troškovima među svim rješenjima koja zadovoljavaju uvjet. Na taj način dobije se optimalan broj baterija i fotonaponskih modula za jedan samostalni sustav s obzirom na zadanu vrijednost LOLP i postavljena ograničenja..

Naravno pri simulaciji se uzima u obzir stanje baterije te ako baterija nije napunjena, a postoji višak energije, tada se baterija puni tim viškom. Također baterija se ne smije isprazniti ispod dozvoljenog minimuma.

### 5.3 Rezultati

Podaci koji su korišteni pri simulaciji prikazani su na slikama 5.14 i 5.15.

	A	B	C	D	E	F	G
7							
8							
9		Mjesec	Sat u danu	Temperatura [°C]	Radijacija [W/m <sup>2</sup> ]	Opterećenje [W]	
10		1.sij	1	0,00	0,00	0,00	
11			2	0,00	0,00	0,00	
12			3	0,00	0,00	0,00	
13			4	0,00	0,00	0,00	
14			5	0,00	0,00	0,00	
15			6	-1,50	0,00	225,426	
16			7	-0,98	0,00	1504,801	
17			8	0,05	48,25	3208,892	
18			9	1,25	141,50	4824,119	
19			10	2,35	205,00	6069,517	
20			11	3,18	245,75	6519,716	
21			12	3,63	263,25	7338,438	
22			13	3,65	257,25	7964,403	
23			14	3,33	228,25	7502,443	
24			15	2,73	176,00	3597,017	
25			16	2,00	99,50	6134,205	
26			17	1,25	5,50	4637,898	
27			18	0,65	0,00	3297,756	
28			19	0,35	0,00	1101,648	
29			20	0,03	0,00	105,852	
30			21	0,00	0,00	0,00	
31			22	0,00	0,00	0,00	
32			23	0,00	0,00	0,00	
33			24	0,00	0,00	0,00	
34		2.sij	1	0,00	0,00	0,00	
35			2	0,00	0,00	0,00	

**Slika 5.14** Podaci u excel datoteci

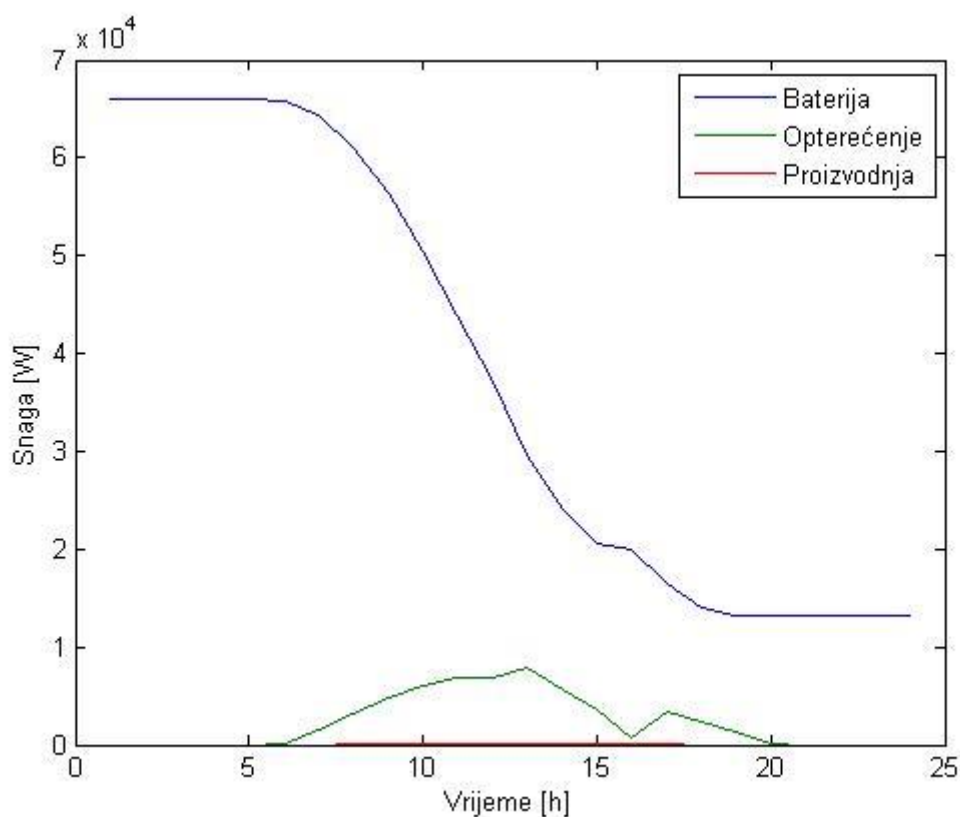
Na slici 5.14 prikazan je izgled Excel datoteke iz koje Matlab uzima vrijednosti prilikom simulacije. Na prvom listu datoteke unesene su vrijednosti za radijaciju i opterećenje kroz čitavu godinu, odnosno za 8760 sati. Vrijednosti dobivene u tablici ranije u tekstu su opisane.

Karakteristike FN modula		Karakteristika baterije		Cijene	
NOCT=	44 [°C]	Kapacitet baterije=	220 [Ah]	Cijena jednog modula=	1300 [kn]
Alpha=	0,045 [A/°C]	Napon baterije=	12 [V]	Cijena jedne baterije=	3750 [kn]
FN_eff=	0,153	Kapacitet baterije=	2640 [Wh]		
Wire_eff=	0,98	Minimalno stanje baterije=	0,2		
INV_eff=	0,95				
V_sys=	230 [V]				
Dimenzije modula		Za potrebe simulacije			
Dužina=	1,6949 [m]	Maksimalni broj modula:	200		
Širina=	0,991 [m]	Maksimalni broj baterija:	50		
A_FN=	1,6796459 [m^2]	LOLP:	0,01		

**Slika 5.15** Podaci u excel datoteci

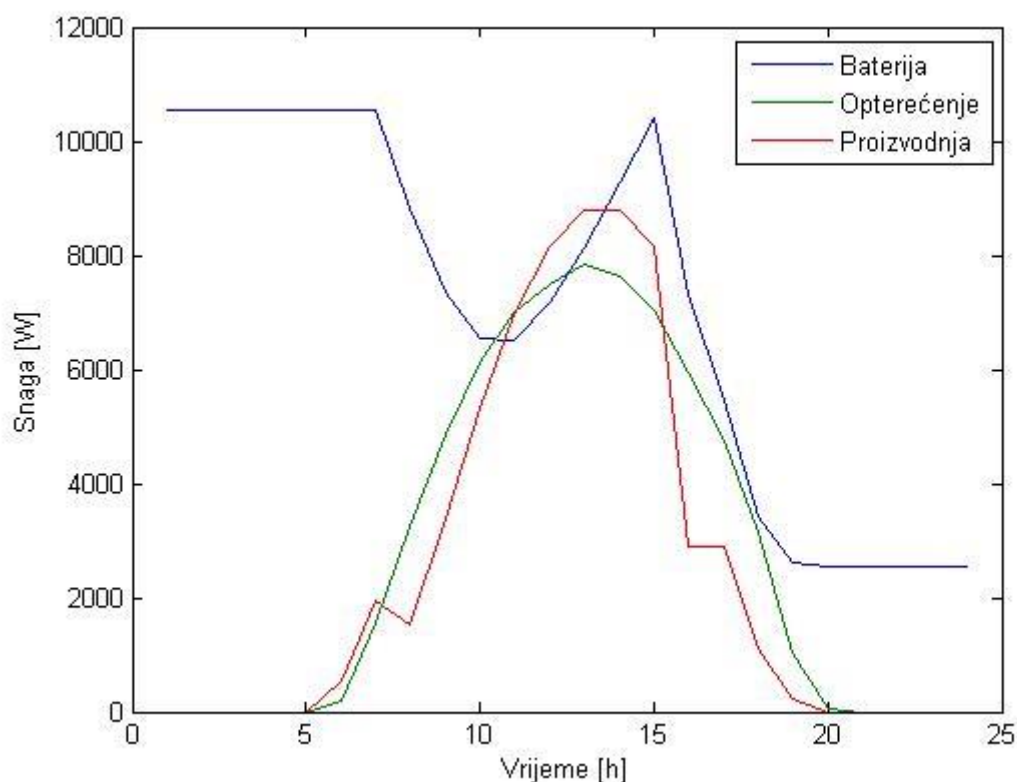
Na slici se vide karakteristike modula i baterija te cijene. Maksimalni broj modula korišten pri simulaciji jednog dana je 200, a maksimalni broj baterija je 50. Zadana vjerojatnost deficita snage za sve simulacije je 1%, odnosno manja od 1%.

Za simulaciju jednog dana uzeti su datumi 15. siječnja i 15. kolovoza. Za 15. siječnja optimalna kombinacija je 3 fotonaponska modula s 25 baterija. Energija proizvodnje, potrošnje te energija baterije grafički su prikazane na slici 5.16.



**Slika 5.16** Rezultati za 15. siječnja

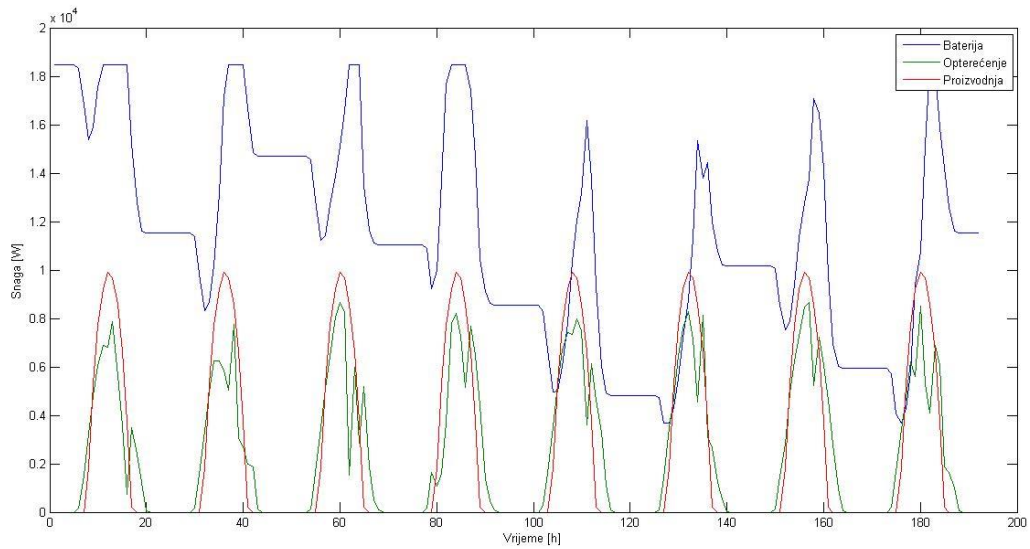
Na prvipogled rezultat je neobičan, ali ovo je slučaj za samo jedan dan, kada je sunčevo zračenje jako slabo te je prilikom simulacije u obzir uzeto da je na početku baterija maksimalno napunjena. Dakle, u ovom slučaju, za 15. siječnja najisplativije je skoro čitavo opterećenje pokriti iz baterija, što bi naravno bio problem sljedeći dan, jer su baterije prazne. Za 15. kolovoza rezultat je drugačiji jer je sunčevo zračenje dosta jače pa je optimalna kombinacija 47 fotonaponskih modula sa 4 baterije. Ukupna površina fotonaponskih panela tada iznosi oko 79 m<sup>2</sup>, a kapacitet baterije je 10560 Wh.



**Slika 5.17** Rezultati za 15. kolovoza

Na slici 5.17 vidi se da je baterija pokrila dio opterećenja koji fotonaponska elektrana nije uspjela pokriti. Tijekom sati vršnog sunčevog zračenja, elektrana proizvodi više energije nego je potrebno te pomoću te energije puni baterije. Iz slike se također vidi da su baterije na kraju dana prazne, što bi bio problem za naredni dan.

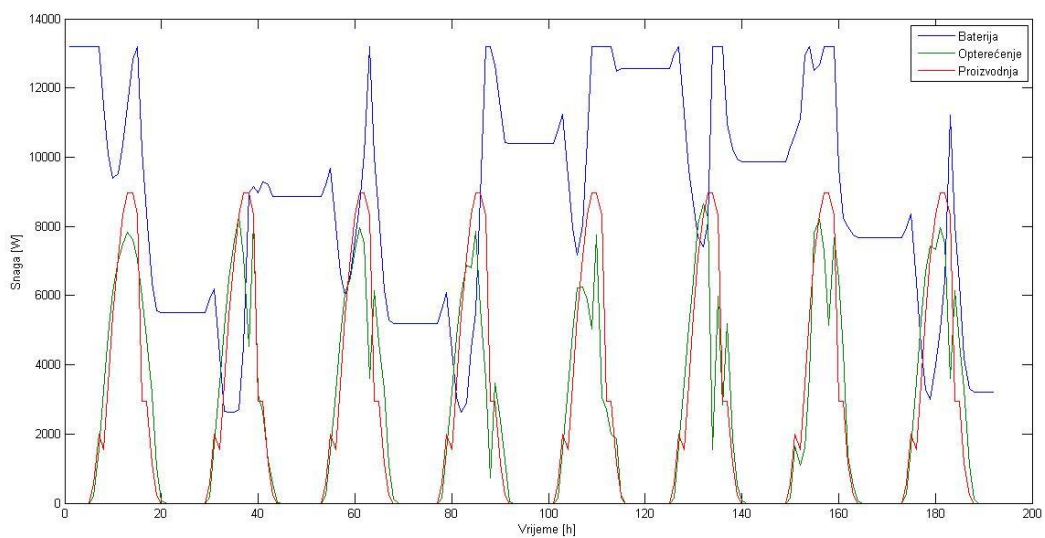
Za osam dana (od 15. do 22.) u mjesecu siječnju optimalna kombinacija je 157 fotonaponskih modula sa 7 baterija. Površina takve elektrane je oko 264 m<sup>2</sup>, a kapacitet baterija 18480 Wh.



**Slika 5.18** Rezultati za razdoblje od 15. do 22. siječnja

Sa slike 5.18 vidi se da je fotonaponska elektrana pokrila vršno opterećenje te čak u razdoblju vršnog opterećenja proizvodi višak energije pomoću kojeg se pune baterije. Baterije pokriju opterećenje izjutra i predvečer, kada nema sunca.

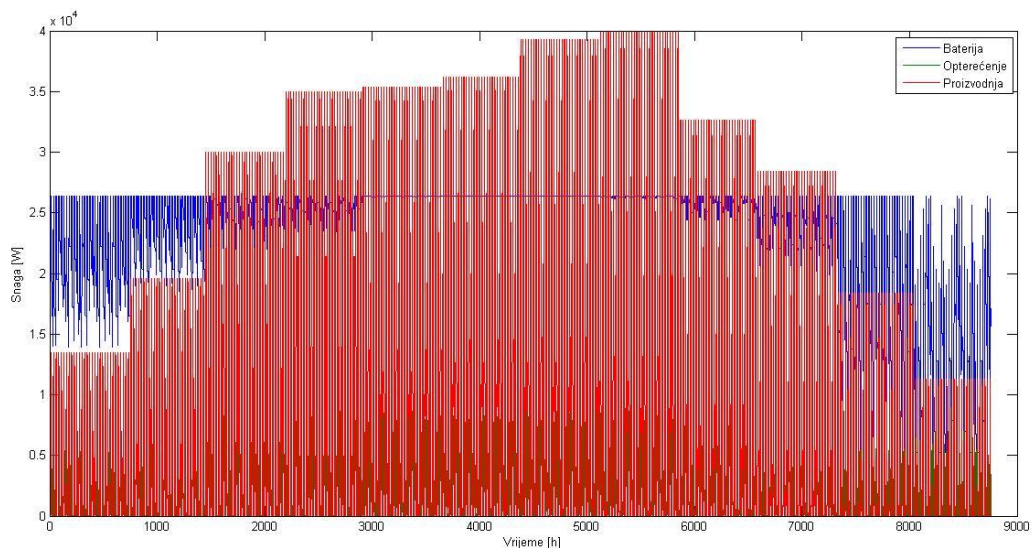
Za osam dana (od 15. do 22.) u mjesecu kolovozu optimalna kombinacija je 48 fotonaponskih modula s 5 baterija. Površina takve elektrane je oko 81 m<sup>2</sup>, a kapacitet baterija 13200 Wh. Usporedbom rezultata može se uočiti da je optimalna površina FN elektrane u kolovozu preko tri puta manja u odnosu na siječanj, također je i broj baterija manji.



**Slika 5.19** Rezultati za razdoblje od 15. do 22. kolovoza

Ako usporedimo slike 5.18 i 5.19 vidimo da je proizvodnja u siječnju sa 157 modula samo za oko 1 kW veća u odnosu na kolovoz sa 48 modula. Može se također uočiti kako u kolovozu sja sunce kroz čitavo razdoblje opterećenja te bi sustav mogao raditi bez baterija, ali bi trebao veći broj modula da pokrije čitavo opterećenje te bi se ogromna količina energije „bacila“. Naravno takvo rješenje bi bilo dosta skuplje. U siječnju sustav ne može raditi bez baterija.

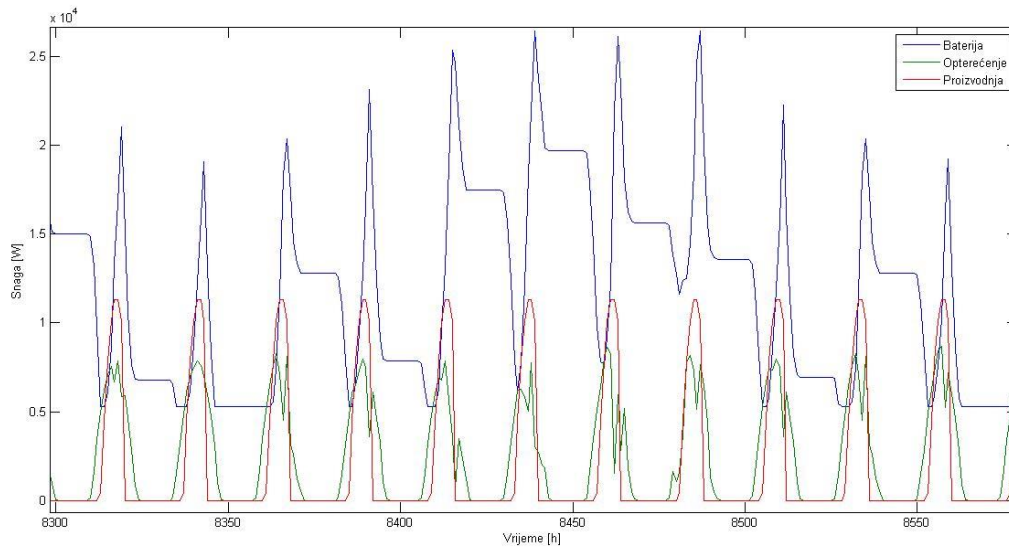
Za izračun optimalnog rješenja za čitavu godinu, maksimalni broj baterija postavljen je na 200, a maksimalni broj modula na 500. Za čitavu godinu optimalno rješenje je sustav od 214 fotonaponskih modula sa 10 baterija. Površina takve fotonaponske elektrane je oko 360 m<sup>2</sup>, a kapacitet 10 baterija je 26400 Wh. Potrošnja, proizvodnja te stanje baterija kroz čitavu godinu prikazane su na slici 5.20.



**Slika 5.20** Rezultat za godinu dana

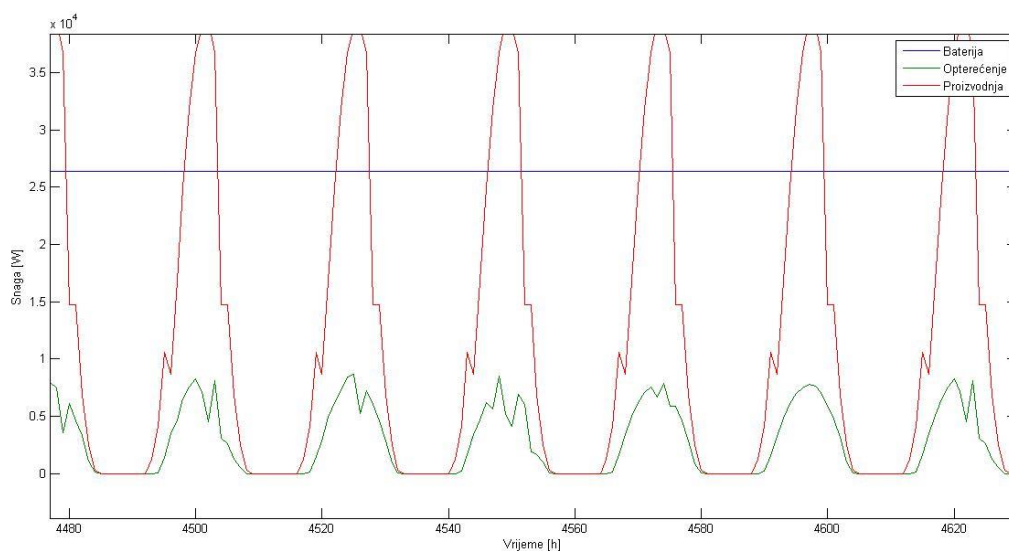
Na slici se može uočiti kako baterija uopće nije potrebna za razdoblje od svibnja do kolovoza. Razlog tomu je taj što je velika elektrana potrebna da bi sustav samostalno radio tijekom zimskih mjeseci pa tako tijekom ljetnih mjeseci imamo ogromnu proizvodnju, s ogromnim viškom energije.





**Slika 5.21** *Zimski dani*

Ako usporedimo slike 5.21 i 5.22 možemo uočiti kako baterija u ljetnim danima nije potrebna, jer nema opterećenja tijekom noći, a zimi je od ključne važnosti za normalan rad sustava. Možemo reći da je elektrana dizajnirana prema najgorem slučaju (najslabije sunčevo zračenje).



**Slika 5.22** *Ljetni dani*

Opterećenje je jednako kroz čitavu godinu ali je zimi manje sunčevo zračenje, a samim time i proizvodnja jednog panela pa je zbog toga potreban broj fotonaponskih panela određen prema sunčevom zračenju u zimskim danima. To je dovelo do toga da je elektrana predimenzionirana tijekom ljetnih dana. Isti slučaj je sa baterijama.

## 6 ZAKLJUČAK

Pohrana velike količine energije velik je izazov. Crpno-akumulacijske hidroelektrane su trenutno odlično rješenje, ali kapaciteti za nova postrojenja su ograničeni, ili ih čak više ni nema. Obnovljivi izvori energije i njihova nejednolika proizvodnja tjeraju na usavršavanje novih mogućnosti pohrane. Ideja pohrane energije u vodik ili metan nije poželjna zbog niske učinkovitosti, ali još uvijek je vjerojatno da će imati ulogu u budućnosti jer imaju velik potencijal za pohranu.

Sunčevo zračenje tijekom zimskih mjeseci je prenisko pa je zbog toga potreban veliki broj fotonaponskih panela i veliki kapacitet baterija da bi takav sustav normalno radio. Ako je slučaj takav da je električna energija potrebna samo tijekom ljetnih mjeseci, tada je optimalan broj panela i baterija zadovoljavajući. Baterije imaju bitnu ulogu kod samostalnih sustava električne energije. Sposobnost baterije da pohrani energiju te je rasporedi kroz vrijeme kada je potrebna uvelike povećava pouzdanost sustava te smanjuje investicije. Također uklanja prijelazne pojave tako što osigurava stabilan napon i struju.

## 6.1 LITERATURA

- [1] Global Energy Network Institute *"Energy Storage Technologies and their Roll in Renewable Energy Integration"*, 2012.
- [2] U.S. Department of Energy *"Grid Energy Storage"*, 2013.
- [3] International Electrotechnical Commission – IEC *"Electrical Energy Storage"*, 2011.
- [4] Catherine Anderson *"Pumped Storage: Environmental considerations of traditional and sea waterschemes with views for future development"*, 2014.
- [5] Grupa autora *"Renewable Energy Focus Handbook"* Elsevier Inc. 2009.
- [6] IEEE „*Electrification magazine*“, Volume 2, Number 2, June 2014.
- [7] Renewable energy integration *"Practical management of variability, uncertainty, and flexibility in power grids"* Lawrence E. Jones, 2014.
- [8] DOE Global energy storage database, dostupno na linku: <http://www.energystorageexchange.org/projects/2154>, posljednji put pristupljeno: 12.9.2016.
- [9] State & Federal Energy Storage Technology Advancement Partnership (ESTAP) Webinar *"Duke Energy's Energy Storage Projects"*, 2013.
- [10] J. Wiley, T. Khatib, W. Elemenreich *"Modeling of photovoltaic systems using matlab"*, 2016.
- [11] Photovoltaic geographical information system, dostupno na linku: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>, posljednji put pristupljeno: 23.9.2016.
- [12] Victron Energy, dostupno na linku: <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-GEL-and-AGM-Batteries-EN.pdf>, posljednji put pristupljeno: 24.9.2016.
- [13] Victron Energy, dostupno na linku: <https://www.victronenergy.com/batteries/gel-and-agm-batteries>, posljednji put pristupljeno: 24.9.2016.

## **6.2 SAŽETAK**

U ovom radu opisani su načini pohrane električne energije, optimizacija samostalnog fotonaponskog sustava sa pohranom, potreba za pohranom električne energije, važnost pohrane, kooperacija obnovljivih izvora i pohrane energije, različiti načini pohrane električne energije, njihov princip rada te njihovi nedostaci i prednosti. Opisana su područja primjene pojedinih tehnologija za pohranu električne energije. Također, opisana je njihova izravna usporedba i nekoliko stvarnih primjera. Prikazana je optimizacija samostalnog fotonaponskog sustava sa pohranom električne energije. Detaljno je opisan način optimizacije te su prikazani rezultati za područje grada Osijeka kroz jedan dan, tjedan i godinu.

## **6.3 ABSTRACT**

The paper describes methods of storing electrical energy and optimization of standalone photovoltaic system with storage. Also it describes the need for storage of electrical energy and the importance of co-operation of renewable energy sources and energy storage. It describes the different methods of storing electrical energy, their principle and their advantages and disadvantages. Furthermore, areas of application of specific technologies for storing electrical energy are described. Also, paper compares different storage types and shows some actual examples. It shows the optimization of standalone photovoltaic system with energy storage and describes the method of optimization and presents the results for the city of Osijek in interval of one day, week and year.

## 6.4 ŽIVOTOPIS

Daniel Kosić rođen je u Zenici 22. ožujka 1993. Godine. Završio je Osnovnu školu Žepče u Žepču. Potom upisuje Tehničko – obrtničku školu Katoličkog školskog centra „Don Bosco“ u Žepču, smjer Mehatronika. Nakon srednje škole upisuje Elektrotehnički fakultet u Osijeku gdje uspješno završava preddiplomski studij elektrotehnike. Trenutno je student druge godine diplomskog studija elektrotehnike, smjer elektroenergetika. Nakon završetka diplomskog studija nastoji se zaposliti i raditi u području elektrotehnike.

Vrlo je ambiciozna osoba željna novih znanja i iskustava. Nema radnih iskustava. Kroz svoje školovanje i samostalno obrazovanje naučio je raditi u mnogim računalnim programima važnim za njegovu struku. Neki od njih su: Matlab, EasyPower, DigSilent, AutoCAD, MS Office, STEP 7 i mnogi drugi.

Od stranih jezika poznaje engleski i njemački u govoru i pismu.

Daniel Kosić

Papratnica bb, 72230 Žepče, BiH

Mobitel: 092 133 08 29 (Hr)

00387 63 474 163 (BiH)

E-Mail: [dkosic@etfos.hr](mailto:dkosic@etfos.hr)

---

Daniel Kosić

## 6.5 POPIS SLIKA I TABLICA

Popis slika:

Slika 3.1 Podjela sustava za pohranu električne energije prema obliku energije koja se koristi[3] .....	4
Slika 3.2 Princip rada akumulacijske hidroelektrane .....	5
Slika 3.3 Yanbaru 30MW crpno-akumulacijska hidroelektrana [4].....	6
Slika 3.4 Sustav pohrane energije komprimiranim zrakom [3].....	7
Slika 3.5 Zamašnjak [3].....	8
Slika 3.6 Tipični Li-ion dizajn u obliku prizme i baterijski moduli [3].....	11
Slika 3.7 NaS baterija: Dizajn ćelije i 50kW modul [3].....	13
Slika 3.8 Shematski prikaz vanadiumredoks protočne baterije [3].....	14
Slika 3.9 Koncept korištenja metana za pohranu energije sunca i vjetra .....	17
Slika 3.10 Ukupni koncept korištenja vodika i sintetičkog prirodnog plina kao energenata .....	18
Slika 3.11 Gubici energije pri procesu dobivanja metana [1] .....	19
Slika 3.12 Sastavni dio supravodljivog magnetskog svitka .....	21
Slika 3.13 Dijelovi supravodljivog magnetskog svitka [1].....	21
Slika 3.14 Sustav pohrane topline na konceptu promjene stanja materijala .....	23
Slika 3.15 Gemasolar u Sevili, solarna termoelektrana sa skladištima rastaljene soli [1] .....	24
Slika 4.1 Usporedba efikasnosti pojedinih tehnologija [1] .....	29
Slika 4.2 Rankin sustav pohrane energije, Mount Holly, Sjeverna Karolina [8].....	31
Slika 4.3 Marshal sustav pohrane energije, Sherrills Ford, Sjeverna Karolina [9] .....	32
Slika 4.4 Sustav pohrane energije sa transformatorom, Charlotte, Sjeverna Karolina [9].....	33
Slika 5.1 Blok shema samostalnog fotonaponskog sustava .....	35
Slika 5.2 Dnevno opterećenje .....	36
Slika 5.3 Tjedno opterećenje.....	37
Slika 5.4 PV GIS .....	38
Slika 5.5 Satni prosjek prema PVGIS-u.....	39
Slika 5.6 Sunčevo zračenje za mjesec siječanj.....	40
Slika 5.7 Sunčevo zračenje za mjesec kolovoza .....	40
Slika 5.8 Sunčevo zračenje kroz godinu dana .....	41
Slika 5.9 Proizvodnja jednog modula u siječnju .....	42
Slika 5.10 Proizvodnja jednog modula u kolovoza .....	43
Slika 5.11 Proizvodnja pedeset modula u kolovoza .....	44
Slika 5.12 Olovno-kiselinska baterija korištena pri simulaciji[13] .....	45
Slika 5.13 Blok dijagram .....	46
Slika 5.14 Podaci u excel datoteci.....	48
Slika 5.15 Podaci u excel datoteci.....	49
Slika 5.16 Rezultati za 15. siječnja .....	49
Slika 5.17 Rezultati za 15. kolovoza.....	50
Slika 5.18 Rezultati za razdoblje od 15. do 22. siječnja .....	51
Slika 5.19 Rezultati za razdoblje od 15. do 22. kolovoza .....	51
Slika 5.20 Rezultat za godinu dana.....	52
Slika 5.21 Zimski dani .....	53
Slika 5.22 Ljetni dani .....	53

Popis tablica:

Tablica 4.1 <i>Područja primjene pojedinih tehnologija</i> [2].....	27
Tablica 4.2 <i>Usporedba gubitaka energije pojedinih tehnologija</i> [1] .....	29
Tablica 4.3 <i>Cijena pojedinih tehnologija</i> [1] .....	30
Tablica 5.1 <i>Karakteristike fotonaponskog modula BISOL BMO 250</i> .....	41





```

for k=1:d
    Ppr(k)=i*PprAC(k); %ukupna proizvodnja FN
    if k==1 %početno stanje baterije
        Cbat_n(k)=Cbatmax;
    else
        Cbat_n(k)=Cbat_n(k-1);
    end
    Pneto(k)=Ppr(k)-Popt(k);
    %ako je opterećenje veće od proizvodnje
    if Pneto(k)<0
        Def(k)=Pneto(k);
        if Cbat_n(k)>Cbatmin
            Praznjenje(k)=Def(k);
            Cbat_n(k)=Cbat_n(k)+Praznjenje(k); %baterija se
prazni

        %ako baterija padne ispod 20%
        if Cbat_n(k)<Cbatmin
            if Cbat_n(k)<0
                Deff(k)=(Cbatmin+(0-Cbat_n(k)));
            else
                Deff(k)=Cbatmin-Cbat_n(k);
            end
            Cbat_n(k)=Cbatmin;
        end
    else
        if Cbat_n(k)>=Cbatmax
            Cbat_n(k)=Cbatmax;
        end

        end
        if k==1
            Pneto_b(k)=Pneto(k)+(Cbat_n(k)-Cbat_n(k));
        else
            Pneto_b(k)=Pneto(k)+(Cbat_n(k-1)-Cbat_n(k));
        end
    end

elseif Pneto(k)==0
    Deff(k)=0;
elseif Pneto(k)>0
    Deff(k)=0;
    if Cbat_n(k)<Cbatmax
        Punjenje(k)=Pneto(k);
        Cbat_n(k)=Cbat_n(k-1)+Punjenje(k);
        if Cbat_n(k)>Cbatmax
            Cbat_n(k)=Cbatmax;
        end
    else
        Damp(k)=Pneto(k);
    end
end

end

end
N_baterija(x,y)=j; %broj baterija za svaki sat i broj FN
modula
N_FN(x,y)=i; %Broj FN modula za svaki sat
LLP_calculated(x,y)=abs((sum(Pneto_b))/(sum(Popt)));

```

```

        y=y+1;
    end
    x=x+1;
    fprintf('%d',i);
    fprintf(' od %d\n',n);
end
aa=size(LLP_calculated);
xx=aa(1,1);
yy=aa(1,2);
cc=1;
for ii=1:xx
    for jj=1:yy
        % if LLP_calculated(ii,jj)>=0.0095 &&
LLP_calculated(ii,jj)<=0.0105
            if LLP_calculated(ii,jj)<=LOLP
                LLP_zad(cc)=LLP_calculated(ii,jj); %svaki LPP koji
zadovoljava kriterij
                B_FN_zad(cc)=N_FN(ii,jj); %svaki broj FN modula koji
zadovoljava kriterij
                C_baterije_zad(cc)=N_baterija(ii,jj); %(broj baterija) svi
kapaciteti baterije koji zadovoljavaju kriterij
                cc=cc+1;
            end
        end
    end
end

AA=B_FN_zad';
BB=C_baterije_zad';
xlswrite(filename,AA,sheetname3,'C10');
xlswrite(filename,BB,sheetname3,'D10');

AAA=[B_FN_zad' C_baterije_zad' cm*B_FN_zad'+cbat*C_baterije_zad'];
[min poz]=min(AAA(:,end));
OPTIM=AAA(poz,:);

i=OPTIM(1);
j=OPTIM(2);

Cbatmax=Cbat*j; %maksimalna vrijednost kapaciteta baterije
Cbatmin=Cbat*j*Cmin; %minimalna vrijednost kapaciteta baterije
for k=1:d
    Ppr(k)=i*PprAC(k);
    if k==1 %početno stanje baterije
        Cbat_n(k)=Cbatmax;
    else
        Cbat_n(k)=Cbat_n(k-1);
    end
    Pneto(k)=Ppr(k)-Popt(k);
    %ako je opterećenje veće od proizvodnje
    if Pneto(k)<0
        Def(k)=Pneto(k);
        if Cbat_n(k)>Cbatmin
            Praznjenje(k)=Def(k);
            Cbat_n(k)=Cbat_n(k)+Praznjenje(k); %baterija se prazni
            %ako baterija padne ispod 20%
            if Cbat_n(k)<Cbatmin

```

```

        if Cbat_n(k)<0
            Deff(k)=(Cbatmin+(0-Cbat_n(k)));
        else
            Deff(k)=Cbatmin-Cbat_n(k);
        end
        Cbat_n(k)=Cbatmin;
    end
else
    if Cbat_n(k)>=Cbatmax
        Cbat_n(k)=Cbatmax;
    end

end
if k==1
    Pneto_b(k)=Pneto(k)+(Cbat_n(k)-Cbat_n(k));
else
    Pneto_b(k)=Pneto(k)+(Cbat_n(k-1)-Cbat_n(k));
end

elseif Pneto(k)==0
    Deff(k)=0;
elseif Pneto(k)>0
    Deff(k)=0;
    if Cbat_n(k)<Cbatmax
        Punjenje(k)=Pneto(k);
        Cbat_n(k)=Cbat_n(k-1)+Punjenje(k);
    if Cbat_n(k)>Cbatmax
        Cbat_n(k)=Cbatmax;
    end
    else
        Damp(k)=Pneto(k);
    end
end
end
plot(Cbat_n,'DisplayName','Cbat_n','YDataSource','Cbat_n');hold
all;plot(Pneto_b,'DisplayName','Pneto_b','YDataSource','Pneto_b');plot
(Pneto,'DisplayName','Pneto','YDataSource','Pneto');plot(Popt,'Display
Name','Popt','YDataSource','Popt');plot(Ppr,'DisplayName','Ppr','YData
Source','Ppr');hold off;figure(gcf);
fprintf('Optimalni broj FN modula: %d\n',i);
fprintf('Ukupna površina FN: %d',i*A_FN);
fprintf(' m^2 \n');
fprintf('Optimalni broj baterija: %d\n',j);
fprintf('Ukupni kapacitet baterija: %d',j*Cbat);
fprintf(' Wh %d\n');
toc;

```