

# Tehno-ekonomska analiza sustava za pohranu električne energije u tržišnim uvjetima

---

Čaldarević, Hrvoje

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:200:333959>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-17**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

**SVEUČILIŠNI STUDIJ**

**TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA SUSTAVA ZA  
POHRANU ELEKTRIČNE ENERGIJE U TRŽIŠNIM  
UVJETIMA**

**Diplomski rad**

**Hrvoje Čaldarević**

**Osijek, 2016.**



**ETFOS**  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET OSIJEK



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

## Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Osijek,

Odboru za završne i diplomske ispite

### Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Ime i prezime studenta:

Studij, smjer:

Mat. br. studenta, godina upisa:

Mentor:

Sumentor:

Predsjednik Povjerenstva:

Član Povjerenstva:

Naslov diplomskog rada:

Primarna znanstvena grana rada:

Sekundarna znanstvena grana (ili polje) rada:

Zadatak diplomskog rada:

Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):

Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:

Primjena znanja stečenih na fakultetu:  
Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka:  
Jasnoća pismenog izražavanja:  
Razina samostalnosti:

Potpis sumentora:

Potpis mentora:

Dostaviti:

1. Studentska služba

U Osijeku,

godine

Potpis predsjednika Odbora:

**ETFOS**

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET OSIJEK

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA****Osijek,****Ime i prezime studenta:****Studij :****Mat. br. studenta, godina upisa:**

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom:

izrađen pod vodstvom mentora

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

## Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE SUSTAVA ZA POHRANU ELEKTRIČNE ENERGIJE .....	2
3. TEHNOLOGIJE ZA POHRANU ELEKTRIČNE ENERGIJE .....	3
3.1 Reverzibilne hidroelektrane .....	3
3.2. Tehnologija pohrane u baterije .....	7
3.2.2 NaS baterija .....	8
3.2.3 Ni-CD baterije .....	9
3.2.4 Ni- MH baterije .....	10
3.3. Protočne baterije.....	11
3.4. Vodik .....	11
3.5. Sustavi za pohranu električne energije mehaničkim putem u oblik kinetičke energije .....	12
3.6. Super- kondenzatori .....	13
3.7. Supravodljivo magnetsko skladištenje energije .....	14
3.8. Sustavi za pohranu energije u komprimirani zrak .....	14
3.8.1. Kompresor .....	15
3.8.2. Spremnici zraka .....	17
3.8.3 Turbina / električni generator .....	19
3.8.4. Huntorf .....	23
4. EKONOMSKA ANALIZA SUSTAVA ZA POHRANU ELEKTRIČNE ENERGIJE .....	25
4.1. Primjer izračuna i usporedbe dvaju različitih sustava za pohranu električne energije .....	26
4.1.1.Sustavi za pohranu električne energije na komprimirani zrak- CAES.....	26
4.1.2. Reverzibilne hidroelektrane .....	30
5. ZAKLJUČAK.....	34
6. LITERATURA.....	35
7. SAŽETAK.....	36
8. ABSTRACT .....	37
9. ŽIVOTOPIS.....	38

## 1. UVOD

Pohrana električne energije već je dugo jedan od sastavnih dijelova europskog energetskeg sustava. Pohrana energije omogućava balansiranje ponude i potražnje energije. Danas, sustavi za skladištenje električne energije (Energy Storage System – EES) u komercijalnoj upotrebi mogu biti određeni kao električni, termički, biološki i mehanički. Pohrana električne energije predstavlja veliki problem što predstavlja temu mnogobrojnih istraživanja. Danas se sustavi za pohranu električne energije mogu naći u transportnim vozilima i elektroenergetskim sustavima. Uređaji za skladištenje električne energije se pune tokom perioda sa niskim energetskeim zahtjevima, a prazne tokom perioda visokih energetskeih zahtjeva da osiguraju podršku elektroenergetskom sustavu kada je to potrebno. Električna energija se ne može direktno čuvati već se može indirektno čuvati pretvaranjem električne energije u neki drugi oblik energije ("skladištenje" energije). Kada je potrebna opskrba električnom energijom, pohranjena energija se transformira nazad u električnu energiju. Velike količine uskladištene energije teško je čuvati i ponovo transformirati. Tehnologije za pohranu električne energije omogućuju elektranama budu optimalno iskorištene. Višak električne energije koji nastaje za vrijeme off-peak sati (kada postoji višak proizvodnih kapaciteta, a cijena električne energije je niža) može biti transformiran i skladišten, a zatim kada je opet potreban može se transformirati u električnu energiju. U ovoj vrsti primjene, koncepti skladištenja energije su ekonomski isplativi kada su troškovi gradnje sustava za skladištenje električne energije, rad i održavanje sustava manji od razlike troškova energije između vršnog i baznog opterećenja. Energetskei sustavi za skladištenje također su opravdani ako su ekonomičniji nego novi proizvodni kapaciteti koji bi se koristili samo u vrijeme vršnog opterećenja. Sustavi za pohranu električne energije također mogu biti korisni u kombinaciji sa povremenim ili alternativnim izvorima električne energije, što je zajednička osobina mnogih obnovljivih izvora energije. Osim toga, sustavi za pohranu električne energije mogu stvoriti dodatne prednosti za sustav, kao što je rotirajuća rezerva, i rezerva za frekvencijsku i naponsku regulaciju. Bitne karakteristike sustava za pohranu električne energije uključuju gustoću energije, gustoću snage, vijek trajanja, cijenu, vrijeme skladištenja energije i održavanje [2].

## 2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE SUSTAVA ZA POHRANU ELEKTRIČNE ENERGIJE [2]

**Gustoća energije** je količina energije pohranjena u sustavu po jedinici mase. Često se kvalificira samo korisna ili izdvojiva energija, što znači da se kemijski nepristupačna energija kao što je zaostala energija mase ignorira.

**Gustoća snage** (specifična snaga zapremine) je količina snage po jedinici zapremine. Zapreminska gustoća snage je u nekim razmatranjima važan parametar, naročito kada je prostor ograničen.

**Trajanje skladištenja** je pogonski ciklus sustava ili rezervoara. Sastoji se od tri djela: punjenje, skladištenje i pražnjenje.

**Brzina punjenja ili pražnjenja** je količina energije u jedinici vremena koja ulazi ili izlazi iz rezervoara.

**Efikasnost skladištenja** je odnos energije koja napusti rezervoar za vrijeme pražnjenja i energije koja uđe u rezervoar za vrijeme punjenja.

**Karakteristika punjenja i pražnjenja** se definira stanjem napona i nivoom ispražnjenosti.

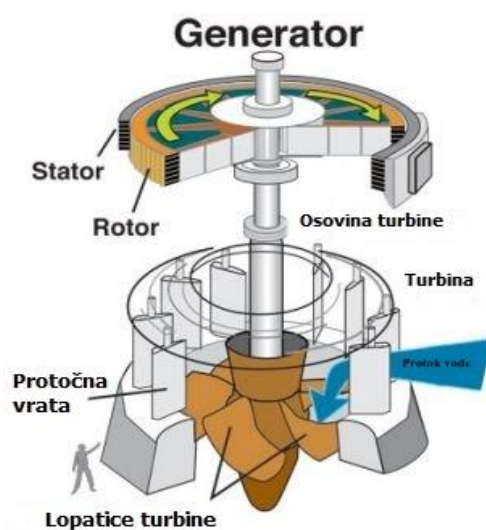
### 3. TEHNOLOGIJE ZA POHRANU ELEKTRIČNE ENERGIJE

Danas je širok izbor tehnologija i principa, bilo mehaničkih, (elektro)kemijskih ili fizičkih, dostupno za pohranu električne energije, zbog čega imamo i veliki spektar performansi i kapaciteta za različita područja i količine primjene. Kritični čimbenik u izgradnji dodatnih kapaciteta za pohranu je ekonomska izvedba u odnosu na alternative. Ona uvelike ovisi o lokalnim uvjetima i koracima koji se moraju poduzeti da bi se osposobio sustav za pohranu [7].

#### 3.1 Reverzibilne hidroelektrane [1]

U elektroenergetskom sustavu uvijek mora postojati ravnoteža između energije koje proizvode elektrane i energije koja je potrebna potrošačima u svakom trenutku. Rješavanje tog problema postiže se izgradnjom reverzibilnih hidroelektrana koje troše višak energije u vrijeme smanjenje potrošnje, a proizvode električnu energiju kada je potrošnja najveća. Reverzibilne hidroelektrane su hidro energetski objekti koji imaju mogućnost promjene funkcije agregata pa isti uređaj može raditi kao električni motor i pumpa, a potom kao generator i turbina.

U oba načina rada se pretežito koristi ista voda jer su vlastiti prirodni dotoci minimalni. Kada sustav radi u crpnom režimu, motor koji se napaja iz mreže pogoni crpku i time se akumulira voda u gornjoj akumulaciji. Tako akumuliranu vodu isti sustav, ali u drugom načinu rada, koristi za proizvodnju električne energije u doba najveće potrošnje.



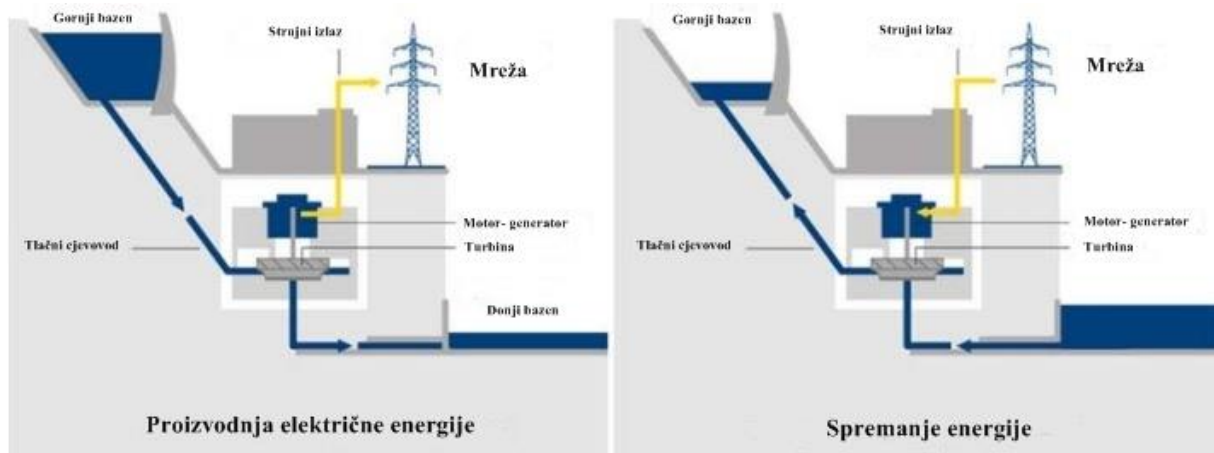
Slika 1. Način rada reverzibilne hidroelektrane [9]



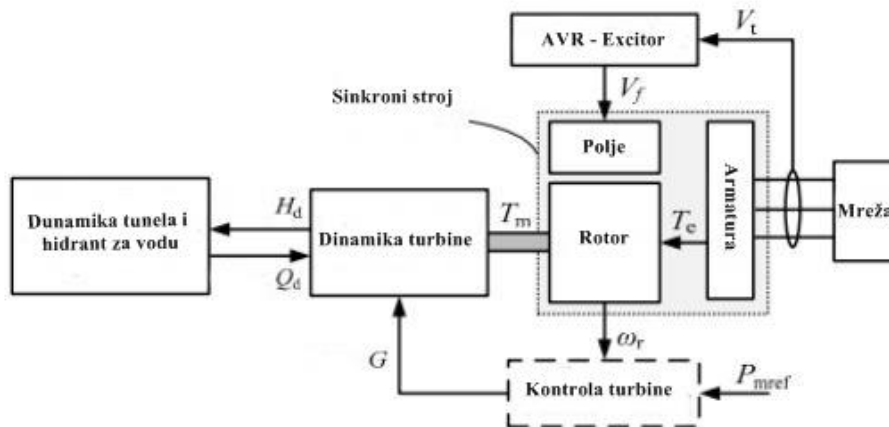
Reverzibilna hidroelektrana ima dva skladišta vode:

- Gornja akumulacija – ima istu ulogu kao akumulacijsko jezero kod klasičnih hidroelektrana. Gradnjom brane osigurava se akumulacija vode koja kada protječe kroz postrojenje ima za posljedicu proizvodnju električne energije.
- Donja akumulacija – voda koja izlazi iz hidroelektrane prelazi u donje akumulacijsko jezero iz kojega se voda crpi u crpnom režimu rada.

Pošto je teško upravljati proizvodnjom električne energije koja se dobiva iz baznih termoelektrana i u posljednje vrijeme sve više iz vjetroelektrana, onda se u doba manje potrošnje javlja višak električne energije pa to za posljedicu ima manju cijenu struje u tom periodu. Reverzibilne hidroelektrane plaćaju tu nižu cijenu struje i koriste je da akumuliraju vodu u gornje jezero, a nakon toga u vrijeme kada su potrebe potrošača za električnom energijom veće, tu istu vodu koriste za proizvodnju električne energije i prodaju je po skupljoj cijeni.



Slika 2. Shema reverzibilne hidroelektrane [9]



Slika 3. Blok dijagram reverzibilne hidroelektrane [9]

U nekoliko slučajeva, kao što je u Kijevu ili Gastadu, velike rijeke služe kao donji akumulacijski bazen, također, postoje postrojenja koja koriste napuštene rudnike kao donji akumulacijski bazen, ali u većini slučajeva su to prirodni ili iskopani bazeni. Čiste reverzibilne hidroelektrane razmjenjuju vodu između dva bazena, ali kombinirane reverzibilne hidroelektrane ujedno generiraju električnu energiju kao konvencijske hidroelektrane kroz energiju toka vode. Za elektrane koje koriste takozvani sistem napumpanog bazena možemo reći da su konvencionalne hidroelektrane. Konvencionalne hidroelektrane koje koriste akumulaciju vode mogu imati sličnu ulogu u električnoj mreži kao one sa sistemom napumpanog jezera, tako da odgađaju proizvodnju električne energije sve dok nije potrebno. Ako uzmemo u obzir gubitke uslijed isparavanja akumulirane vode i gubitke uslijed pretvaranja, približno 70% do 85% električne energije koja se koristi za napumpavanje vode u viši bazen može biti vraćeno. Ova tehnologija je trenutno najisplativija u smislu čuvanja velike količine električne energije, ali troškovi izgradnje i prisutnost problema pogodnog zemljopisnog položaja (razlika u visini između bazena) su kritični faktori u odluci u izgradnji. Jedini način da stvorimo značajnu količinu električne energije je taj da imamo veliku količinu vode na što većem brdu iznad donjeg bazena. Na primjer, 1000 kilograma vode (1 kubni metar) na vrhu od 100 metara visokog tornja ima potencijalnu energiju od oko 0.272 KWh.

Reverzibilna hidroelektrana Velebit izgrađena je na rijeci Zrmanji, a na Gračačkoj visoravni prikuplja vodu rijeka Rečice i Opsenice te potoka Otuče i Krivaka. U crpnom pogonu, koristi noćni višak energije, crpi vodu iz donje akumulacije na Zrmanji i upumpava je u gornju akumulaciju Gračačkoj visoravni da bi se ta ista voda mogla koristiti za proizvodnju

električne energije u periodu povećane potražnje. U RHE Velebit ugrađena su dva agregata koja mogu raditi u četiri načina rada: generatorskom, motornom te u dva načina rada kompenzacijskog rada.

Tablica 1. Osnovne tehničke osobine RHE Velebit [1]

<b>Hidrološki podaci</b>	
Srednji protok	119,4 m <sup>3</sup> /s
<b>Akumulacijsko jezero- bazen Opsenica (gornji)</b>	
Zapremina	2,7 x 106m <sup>3</sup>
Najveća visina nivoa	575,00 m NM
<b>Akumulacijsko jezero- bazen Štikada (gornji)</b>	
Zapremina	13,66 x 106 m <sup>3</sup>
Korisna zapremina	9,6 x 106 m <sup>3</sup>
Najveća radna visina nivoa	553,50 m NM
Najveća visina preljeva	554,00 m NM
Najniža radna visina nivoa	550,00 m NM
<b>Akumulacijsko jezero- bazen Razovac (donji)</b>	
Zapremina	1,84 x 106 m <sup>3</sup>
Najveća visina nivoa	9,00 m NM
Najniža visina nivoa	6,5 m NM
<b>Energetski podaci</b>	
Najveći bruto pad	550,00 m NM
Instalirani protok u turbinskom radu	60,00 m <sup>3</sup> /s
Instalirani protok elektrane u pumpnom radu	40,00 m <sup>3</sup> /s
Instalirana snaga	276 MW
Prosječna godišnja proizvodnja	430 GWh
Energetska vrijednost akumulacije Štikada i Opsenica	14,8 GWh
<b>Podaci o opremi- turbina</b>	
Tip	Jednostepena turbina- pumpa
Konstruktivni pad turbine	517,00 m
Konstruktivni pad pumpe	559,00 m

Snaga turbine	140 MW
Instalirani protok turbine	2 x 138 m <sup>3</sup> / s
Instalirani protok pumpe	2 x 120 m <sup>3</sup> / s
<b>Podaci o opremi- generator</b>	
Tip	Sinhroni generator- motor
Snaga generatora	2 x 138 MW
Snaga motora- pumpe	2 x 120 MW
Srednji energetskekvivalent	1,25 kWh / m <sup>3</sup>
Faktor snage	0,89
Broj okretaja generatora	600 min <sup>-1</sup>

### 3.2. Tehnologija pohrane u baterije [2]

Ova tehnologija se oslanja na elektrokemijske reakcije za skladištenje električne energije. Energija sadržana u kemijskim vezama aktivnog materijala se vraća natrag u električnu energiju kroz niz reakcija oksidacije/redukcije.

Trenutno se koristi niz različitih vrsta baterija, kao što su :

- Litij-ionska ( Li-ion)
- Natrij- sumporne ( NaS)
- Nikal- Kadmij (Ni-CD)
- Nikal- Metal –hibridna (NI-MH)
- Olovno-sulfatne (PB- Kiselina)

#### 3.2.1 Litij-ionska ( Li-ion)

Li-ion baterije su suvremeni tip baterije koje danas prevladavaju kao izvor napajanja mobilnih telefona , digitalnih fotoaparata , laptop računala, kamera i dr. Odlikuje ih mala masa, znatno veći kapacitet od NI-MH baterija i veći napon (3.6 V). Sa druge strane, same po sebi su vrlo osjetljive i zato se standardno isporučuju s elektronikom koja regulira njihovo punjenje i pražnjenje. Li-Ion baterije ne pokazuju memorijski efekt. Zanimljivo je da Li-Ion baterija prilikom punjenja vrlo brzo dostigne 70% do 80% kapaciteta, dok je za punjenje do 100% potrebno barem još toliko vremena.

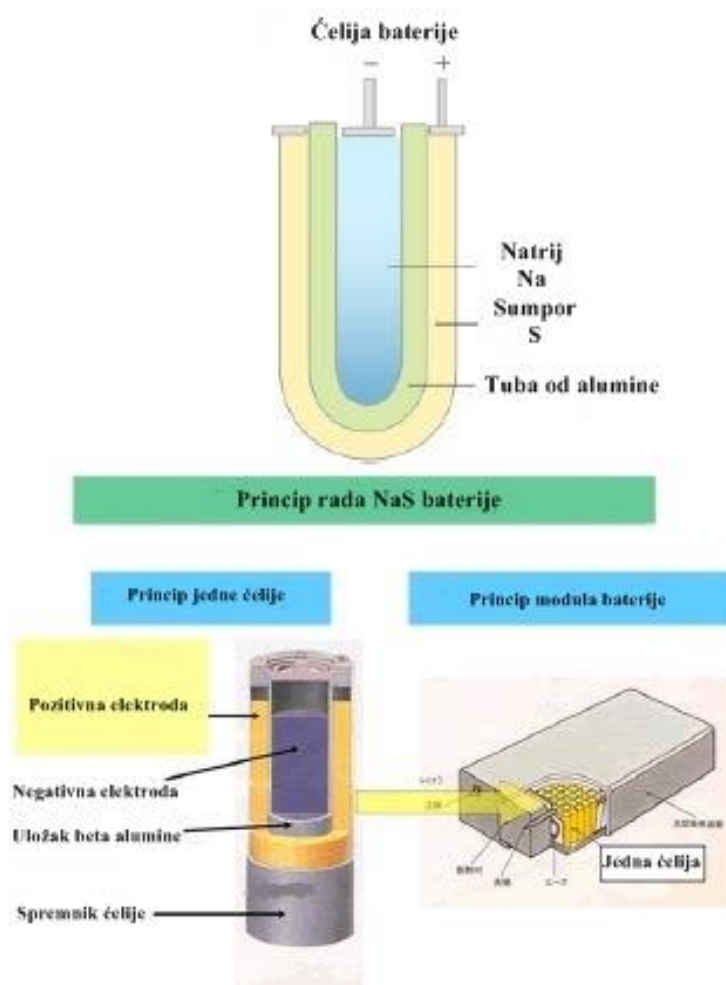


Slika 4. LI-Ion baterija [2]

LI-Ion baterije pune se složenim i vrlo preciznim postupkom i ne preporučuje se nikakvo drugo punjenje nego na punjačima koji su za njih namijenjeni. Elektronika ugrađena u svaku LI- Ion bateriju brine se o tome da se baterija ne napuni ni ne isprazni van dozvoljenih granica.

### 3.2.2 NaS baterija

Nas baterija je vrsta “suhe“ baterije i sastoji se od pozitivne elektrode – sumpora S, negativne elektrode – natrija Na i keramičkog elektrolita – Beta aluminija, koji ima svoja svojstva provođenja natrijevog joda i koji se nalazi između elektroda. Sve je to okupljeno u metalnom kućištu i održavano pod radnom temperaturom od oko 300 Celzusa. U takvim uvjetima, elektrolit je u čvrstom stanju, a aktivne elektrode su u tekućem stanju. Za vrijeme pražnjenja baterije odnosno korištenja energije, ioni natrija prelaze iz negativne elektrode kroz elektrolit i zaustavljaju se na pozitivnoj elektrodi – sumporu. Strujni krug se zatvara kroz strujni krug potrošača energije.



Slika 4. NaS baterija [2]

### 3.2.3 Ni-CD baterije

Ni-CD baterija predstavlja prvu široko prihvaćenu punjivu bateriju opće namjene. Usprkos tome što nudi nisku gustoću energije, a i kemijski sastav joj je daleko od ekološki prihvatljivog. Odlikuje ju veliki životni vijek i dobro podnošenje većih struja pražnjenja što je čini danas vrlo pogodnom za određene primjene. Ni-CD baterije imaju vrlo izražen memorijski efekt, koji diktira način njihovog korištenja. Zbog memorijskog efekta Ni-CD baterije je potrebno u potpunosti isprazniti prije novog punjenja jer bi se inače dogodilo da im se kapacitet trajno smanji.



Slika 5. Ni-Cd baterije [2]

### 3.2.4 Ni- MH baterije

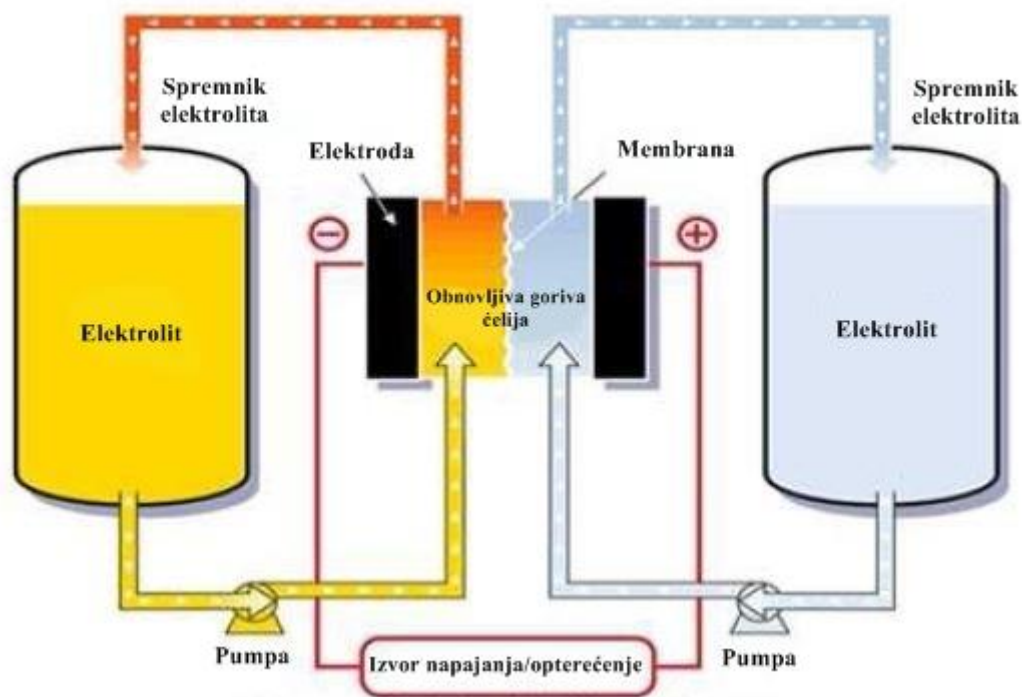
Ni-MH baterije vrlo su raširen tip baterija. Odlikuje ih veći kapacitet od Ni-Cd baterija i znatno manje izražen memorijski efekt. Može se primijetiti da je veliko samopražnjenje baterije. Ni-MH baterije mogu podnijeti oko 500 ciklusa punjenja i pražnjenja. Jako je važno početno formiranje baterije. Nova baterija se mora napuniti prije prve upotrebe i također se preporučuje da se prva tri ciklusa bateriju potpuno puni i prazni.



Slika 6. Ni-MH baterija [2]

### 3.3. Protočne baterije [2]

Većina baterija sadrži sav elektrolit i elektrode unutar jednog kućišta. Protočna baterija je neobična zbog toga što je glavna elektrolita, uključujući i otopljene reaktivne vrste, smještena u različitim odjeljcima. Elektroliti se pumpaju kroz reaktor koji sadrži elektrode, kada se baterija puni ili prazni. Zato što su elektrode očuvane, a elektrolit izgara, protočnu bateriju je najbolje opisati kao reverzibilnu gorivu ćeliju. Ovakav tip baterija obično se koristi za skladištenje velikih količina energije. Imamo nekoliko tipova koji su razvijeni i trenutno se koriste željezo-krom protočnu bateriju, vanadij redoks bateriju i cink- brom protočnu bateriju.



Slika 7. Princip rada protočne baterije [2]

### 3.4. Vodik [2]

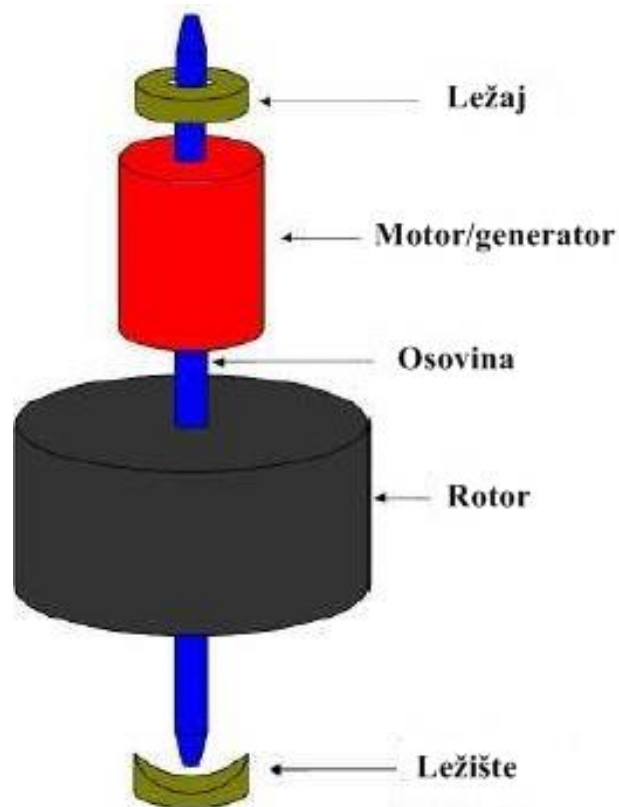
Vodik možemo koristiti za akumulaciju električne energije kroz proces reverzibilne elektrolize vode. Vodik proizveden na taj način pretvara se natrag u električnu energiju u razdobljima potražnje pomoću gorivih ćelija ili sagorijevanjem. Vodik je kao obnovljivi izvor energije, najprivlačnije gorivo za gorive ćelije jer ima odličnu elektrokemijsku reaktivnost, osigurava odgovarajuću gustoću snage za primjenu kod automobila i u toku reakcije ne proizvodi zagađujuće produkte. Postoji nekoliko metoda za proizvodnju čistog vodika iz



molekula koje sadrže vodik. Vodik se može izdvojiti iz prirodnog plina, možemo dobiti iz vode elektrolizom ili se može proizvesti biološki od algi ili određenih vrsta bakterija.

### 3.5. Sustavi za pohranu električne energije mehaničkim putem u oblik kinetičke energije

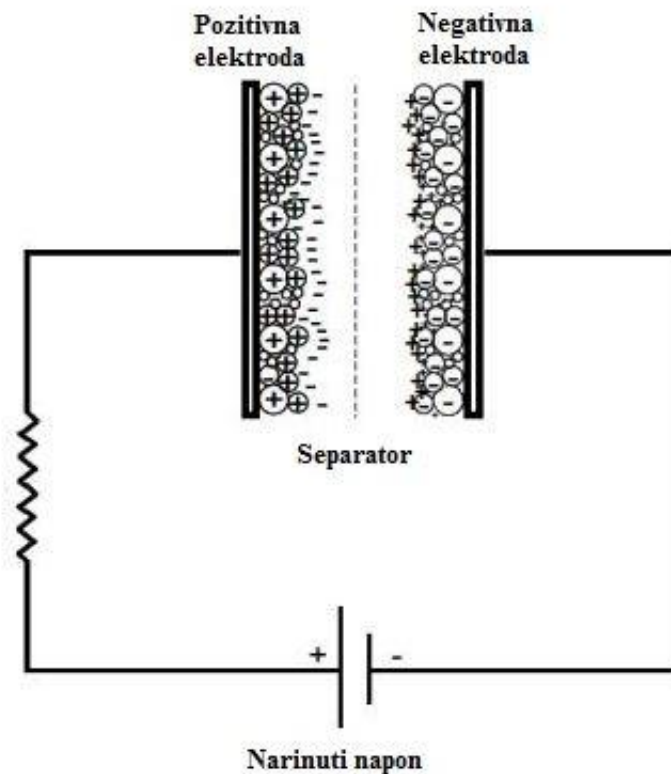
Sustavi za pohranu električne energije mehaničkim putem u obliku kinetičke energije temelji se na konceptu zamašnjaka. Zamašnjak je rotirajući mehanički uređaj koji se koristi za spremanje mehaničke energije. Ima veliki moment inercije zbog čega polako usporava. Količina spremljene energije proporcionalna je kvadratu brzine vrtnje. Energija se zamašnjaku dovodi pomoću vanjskog momenta i tada zamašnjak ima ulogu motora. Kada zamašnjak daje, ima ulogu generatora, daje moment teretu i smanjuje se brzina vrtnje. Zamašnjaci se često koriste u sustavima u kojima je potreban kontinuirani mehanički rad, a izvor mehaničkog rada nije kontinuiran. Zamašnjak prima ili daje energiju u ovisnosti o promjenjivom momentu na koljenastom vratilu. Zamašnjak se danas najviše koristi u radilici automobila pritom zamašnjak prima energiju koju daju cilindri dok se podižu, a daje energiju kada niti jedan cilindar nije u fazi podizanja.



Slika 8. Zamašnjak [2]

### 3.6. Super- kondenzatori [2]

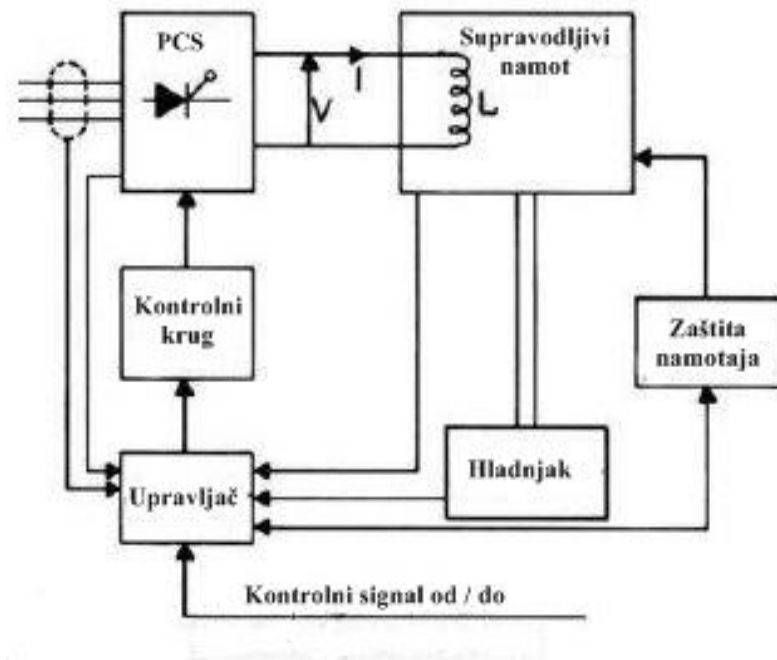
Kondenzator je elektronički element, koji može sačuvati energiju u obliku električnog polja između dvije elektrode razdvojene izolatorom. Njegova osnova veličina je kapacitet. Energija je proporcionalna površini ploča, a obrnuto proporcionalna njihovoj udaljenosti. Želimo li u kondenzator uskladištiti što više energije, moramo povećati površinu i smanjiti razmak između sloja suprotnih naboja. Razmak možemo smanjiti tako da između ploča kondenzatora ubacimo dielektrično sredstvo. Tada će se između svake metalne elektrode i površine dielektrika formirati bliski dipolni sloj. Razmak se može dodatno smanjiti ako se jedna elektroda zamjeni elektrolitom. Tada se dipolni sloj i električno polje formiraju samo u vrlo tankom sloju na elektrodi. Kod super-kondenzatora je napravljen veliki iskorak. Površina elektroda je višestruko povećana uz pomoć poroznih elektroda. Elektrode su presvučene nano metarskim slojem izolatora uronjene u elektrolit. Dipolni sloj se formira u vrlo tankom sloju, između površine nano čestice i elektrolita. Super-kondenzatori mogu imati ogroman kapacitet i do 3000 F, ali njihov radni napon je malen i iznosi oko 2 V. Za razliku, od baterije super-kondenzatori mogu razviti veliku snagu i imati gotovo neograničen broj ciklusa punjenja-pražnjenja.



Slika 9. Super- kondenzator [10]

### 3.7. Supravodljivo magnetsko skladištenje energije [2]

Ova tehnologija se zasniva na principu koja ne koriste druge tehnologije za skladištenje energije. Princip zasnovan na induktivnom skladištenju energije u magnetskom polju koje proizvodi struja koja teče kroz supravodljivu zavojnicu. Električna struja može bez gubitaka teći supravodljivim krugom. Dobro odgovara skladištenju i pražnjenju energije pri velikim snagama. Sprema energiju u magnetskim poljima stvorenim istosmjernom strujom od kriogeno hlađenih supravodljivih materijala. Prednost kriogeno hlađenih, supravodljivih materijala je da je otpornost tog materijala jednaka nuli kada je ohlađen. SMES se brzo puni i može ponoviti punjenje/pražnjenje tisuće puta bez degradacije magneta i može postići potpunu snagu za 100 ms. Imaju visoku efikasnost skladištenja energije i služi kao odlična tehnologija za opskrbljivanje jalove električne energije po potrebi.



Slika 10. Princip rada SMES sustava [2]

### 3.8. Sustavi za pohranu energije u komprimirani zrak [2]

Sustav za pohranu energije u komprimirani zrak (engl. Compressed air energy storage, CAES), sastoji se od tri glavna djela :

- Kompresora/ električnog motora
- Spremnik zraka
- Turbine/ Električnog generatora

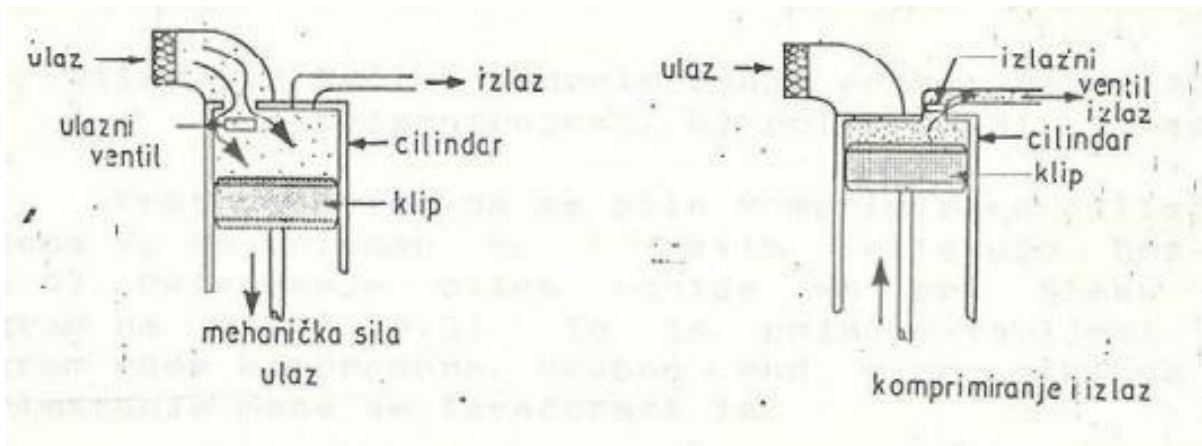
### 3.8.1. Kompresor

Tijekom vrhunca proizvodnje električne energije, snaga se crpi iz mreže i koristi se za pokretanje kompresora zraka, koji komprimira zrak i gura ga u spremište koje može biti neka podzemna pećina ili neki spremnik koji se nalazi na tlu. Ovaj komprimirani zrak se koristi za vrijeme vršnog opterećenja kada, na primjer, vjetroelektrana ne može ispuniti zahtjeve za potražnjom električne energije. Ovaj komprimirani zrak u kombinaciji sa gorivom sagorijeva što za uzvrat pokreće plinsku turbinu. Plinska turbina je zajedno sa električnim generatorom povezana u mrežu. To povećava učinkovitost plinske turbine zbog toga što je ciklus komprimiranog zraka eliminiran pomoću dodatnog generiranja komprimiranog zraka. Stoga gubitak snage zbog rasipanja je izbjegnuto [3].

Kompresori dolaze u više vrsta ovisno o dizajnu i radu. Općenito postoje dvije vrste kompresora, a to su :

- Štapni kompresori ili volumetrički kompresori
- Turbokompresori ili strujni kompresori

Princip rada volumetričkih kompresora sastoji se u tome da se pomoću konstrukcijskih elemenata ostvari u kompresoru takav prostor koji se relativnim pokretanjem tih elemenata može periodički povećavati i smanjivati. Dakle, plin se komprimira zbog promjene radnog prostora. Strujni princip rada kompresora sastoji se u tome da se neprekinuta struja nekog plina niskog pritiska utroškom mehaničke energije ubrza, pri čemu znatno poraste kinetička energija. Provođenjem tako ubrzane struje plina kroz proširene kanale pretvara se, uz smanjenje brzine, kinetička energija struje u potencijalnu energiju uz porast tlaka plina. Na volumetričkom principu grade se štapni kompresori koji s obzirom na izvedbu svojih potisnih elemenata su štapni kompresori sa linearno oscilirajućim štapom i rotorni kompresori s rotirajućim potisnim elementima. Kompresori sa linearno oscilirajućim štapom dobavljaju periodički pulsirajući komprimirani zrak. Uobičajeno se koriste sa tlačnim spremnikom za apsorpiranje rezultata pulsirajućeg efekta i osiguranje stabilnog pritiska. Rotorni kompresori proizvode stalni izlazni tok i obično su direktno spojeni na cijevnu instalaciju [6].



Slika 11. Princip rada štapnog kompresora [6]



Slika 12. Centrifugalni kompresor zraka [3]

### 3.8.2. Spremnici zraka [3]

Tipovi geologije koji su pogodni za skladištenje komprimirane energije zraka možemo klasificirati u 3 tipa:

- Sol
- Tvrdi kamen
- Porozni kamen

Skladištenje u solnim rudnicima se može razviti tako što se izbuši bunar u solnoj formaciji. Voda se ulijeva u bunar kako bi se otopila sol. Zatim se otopina soli ekstraktira na površinu što rezultira nastajanjem pećine. Ova pećina se zatim zapečati sa neprobojnom soli koja posluži kao plomba koja sprječava curenje. Ovakva špilja je veoma pogodna za podzemno skladištenje zraka. Dva su tipa depozita: slojevito granulalni i u obliku svoda. Bez obzira što se oba tipa formacije mogu koristiti u podzemnom skladištenju, formacije u obliku svoda su bolje zbog rasporeda skladištenja. Slojevite granularne formacije često imaju nečistoće i relativno su tanje, što predstavlja rizik za strukturalnu stabilnost skladišta. Špilje koje su na ovaj način izrudarene i koriste se za spremnici zraka rade nalaze se u Huntorf (Njemačka) i McIntosh-u (Alabama).

Pećine izrudarene u tvrdom kamenu se rade bušenjem i iskopavanjem kamena pomoću miniranja. Troškovi rudarenja tvrdog kamena su relativno visoki, ali se mogu smanjiti korištenjem već postojećih rudnika. Postojeći vapnenački rudnik je bio predložen i korišten za izgradnju Norton, Ohio CAES postrojenja. Rudnici od tvrdog kamena su najbolje opcije za skladištenje sa mogućnošću skladištenja komprimiranog zraka na duži period.

Skladištenje u poroznom kamenu košta najmanje, barem što se tiče izgradnje postrojenja za skladištenje velikog volumena. Uslijed niskih troškova razvoja i dostupnih lokacija poroznog kamena, ovo je jedna od najprikladnijih opcija za dizajniranje skladišta za CAES. Porozni kamen se opsežno koristi u skladištenju prirodnog plina. Kako zrak ima drugačija fizikalno kemijska svojstva od prirodnog plina, i dalje postoji potreba za pronalaskom praktičnih rješenja kako bi skladištenje zraka bilo izvedivo. Upravo se jedno od rješenja testira IOWA STOREG ENERGY grupa, Dallas centar, IOWA gdje je za ovo postrojenje predložen porozni kamen za skladištenje zraka.

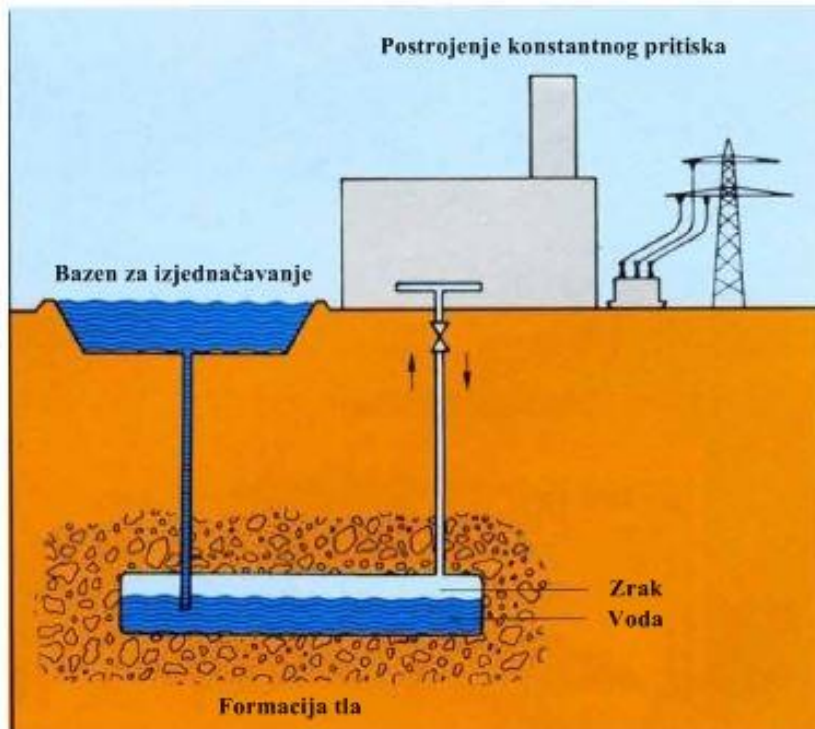
Tablica 2. Trošak kapaciteta i rezerve CAES-a [4]

Vrste geologije	Trošak kapaciteta ( \$/kWh)
Slane pećine – kopanje otopinom	0.6 – 3
Slane pećine – kopanje	6
Porozni kamen	0.06
Tvrđi kamen – postojeći rudnici	6 – 18
Tvrđi kamen- iskopani rudnici	18
Napušteni rudnici ugljena	6

Postoje dva načina skladištenja zraka:

- Konstantnim volumenom
- Konstantnim tlakom

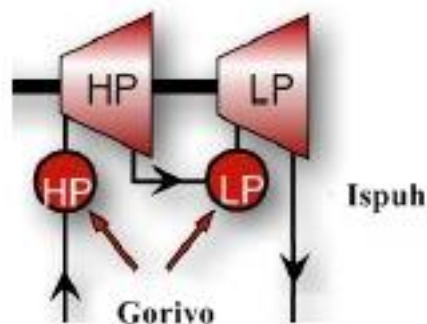
Postojeća CAES postrojenja koriste skladištenje konstantnog volumena. Postrojenje radi unutar određenog intervala što se tiče tlaka. Ako se pritisak smanji ispod određene razine, turbina ne bi učinkovito radila. Zbog toga se uvijek održava određena masa zraka unutar postrojenja da bi se održao minimalan potreban pritisak. S obzirom da je volumen skladišta velik, potrebna je velika masa zraka kako bi se održao pritisak. Druga tehnika skladištenja zraka je konfiguracija konstantnog pritiska. U ovoj konfiguraciji tlak zraka unutar skladišta se održava konstantnom promjenom njegovog volumena s upumpavanjem vode koja se nalazi u bazenu iznad. Kako masa zraka pada, uslijed cikličkog ispuštanja, u skladište se pušta voda kako bi pritisak ostao isti. Vrijedi i obrnuto, kada se skladište puni zrakom, voda se ispušta. Ova tehnika jedino se može koristiti u skladištima od tvrdog kamena, s obzirom da voda otapa sol.



Slika 13. Postrojenje sa konstantnim pritiskom [3]

### 3.8.3 Turbina / električni generator [3]

Pohranjeni komprimirani zrak se pušta prema ekspanderima u turbini. Ovaj komprimirani zrak se zatim miješa sa prirodnim plinom, i zatim prije nego uđe u ekspander, sagorijeva ili ga se zagrijava pomoću nekog izvora toplinske energije kako bi se pokrenula turbina. Danas se najčešće koriste plinske turbine.



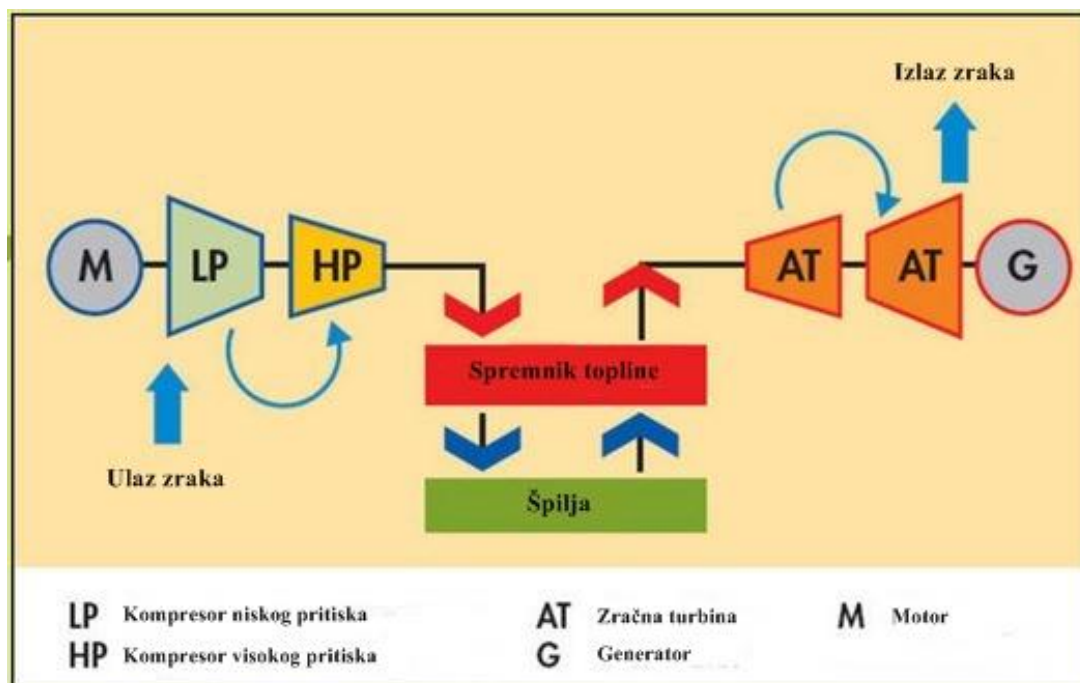
Slika 14. Plinska turbina [3]



Komprimiranjem zraka stvara se toplina tj. zrak je topliji poslije komprimiranja. Ukoliko se dodatna toplina ne dovede, zrak će poslije širenja biti mnogo hladniji. Ako toplinu koja je generirana tokom komprimiranja može skladištiti i koristiti tokom širenja, efikasnost skladištenja se značajno poboljšava.

Postoje tri načina koji ovi sustavi koriste za pohranu zraka

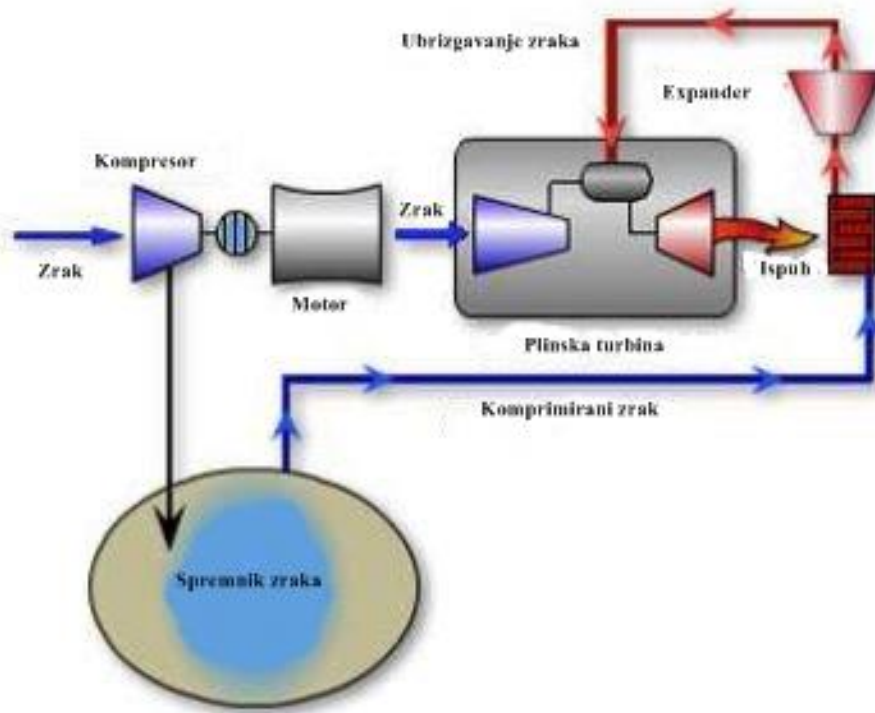
- Adijabatski način pohrane
- Dijabatski način pohrane
- Izotermalni način pohrane



Slika 15. Adijabatski način pohrane [8]

Najveći problem ovog načina skladištenja energije nije pneumatski motor, ni generator već rezervoar. On predstavlja potencijalnu opasnost za okolinu. U slučaju velikog pritiska, može doći do eksplozije. Pritisak u rezervoaru je podložan promjeni pod djelovanjem temperature, pa rijetko kada može biti puna iskorištenost kapaciteta. Zbog, ovih problema, moguće je da se umjesto klasičnih rezervoara koristi zemlja. Zemljina kora se buši, kroz bušotinu se naizmjenično ubacuje i izbacuje voda koja pod djelovanjem erozije pravi špilju ispod zemljine površine. Ukoliko je bušotina na dovoljnoj dubini, dobiva se ekološki sigurni rezervoar visokog pritiska. U periodu viška električne energije zrak se kompresorima

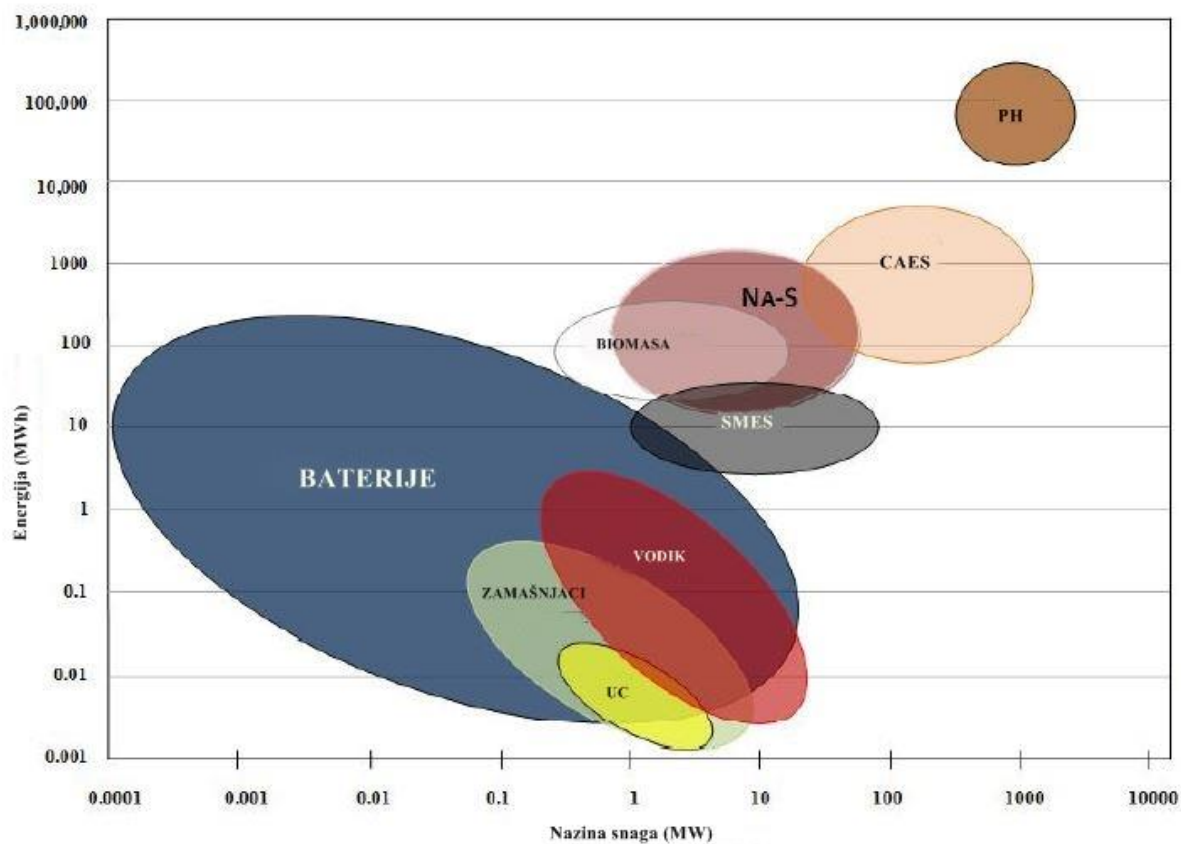
upumpava u podzemnu špilju. U periodu njenog manjka, od potencijalne energije zraka iz špilje se pneumatskim motorom i elektro generatorom dobiva električna energija.



Slika 16. Princip rada sustava na komprimirani zrak [2]

S obzirom da je rezervoar potpuno hermetički zatvoren, ovakav način skladištenja energije je veoma pogodan za njeno skladištenje u dužem vremenskom periodu. Potencijal uskladištene energije jedino zavisi o veličini podzemne špilje i pritiska. Danas postoje dva tipa ovakvog postrojenja. Jedno se nalazi u Hantorfu a drugo u Alabami. Efikasnost 320 MW elektrane u Njemačkoj je 42 %, a u Alabami 54 % što je za 20 % niže od efikasnosti reverzibilnih elektrana. Efikasnost smanjuje zrak koji se prilikom komprimiranja zagrijava, mora se najprije ohladiti na sobnu temperaturu prije nego što se smjesti u rezervoar pa se hladan zrak mora ponovo zagrijati za proces pražnjenja iz rezervoara pošto se naglo hladi širenjem u turbini kod generiranja električne energije. Zbog toga se sada radi na projektu skladištenja adijabatski komprimiranog zraka za opskrbljivanje električnom energijom.“ Adijabatski“ ovdje znači dodatno korištenje toplote komprimiranja kako bi se povećala efikasnost. Prilikom sabijanja zraka, toplina se ne oslobađa u okruženje, već se prikuplja u objektu za skladištenje toplote. Prilikom pražnjenja zraka, uređaj za skladištenje toplote oslobađa toplinu u komprimirani zrak, tako da nije potreban plin za sagorijevanje da bi se zagrijao komprimirani zrak. Na taj način moguće je postići 70 % efikasnosti. Uz to izbjegnuto je

djelovanje fosilnih goriva. Dakle, ova tehnologija omogućava CO<sub>2</sub> neutralnost kod pokrivanja vršnog opterećenja iz obnovljivih izvora energije.



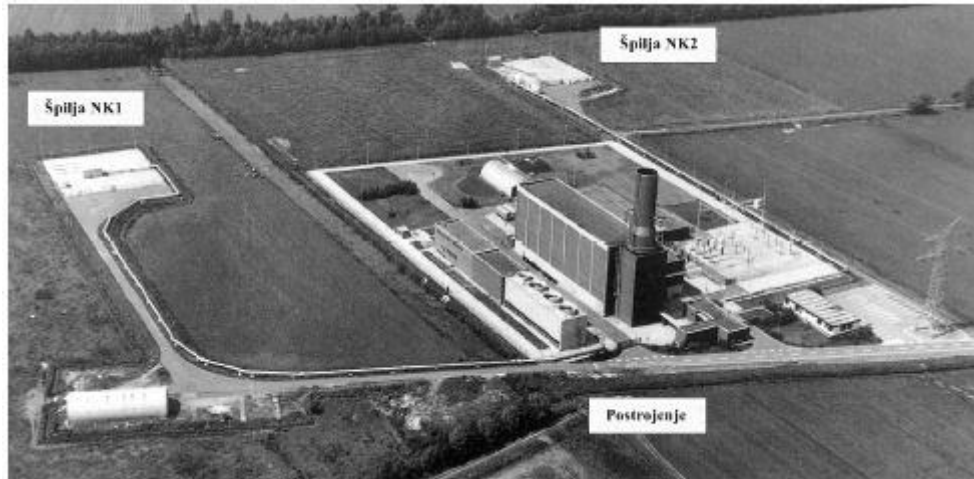
Slika 17. Usporedba različitih tipova skladištenja energije[3]

Tablica 3. Karakteristike tehnologija za skladištenje energije [4]

Tehnologije za pohranu	Tipična snaga	Efektivnost punjenja/praznjenja	Vrijeme za reakciju	Trajanje praznjenja
PHS	250-1000	80%-87%	Od sekunde do minute	Nekoliko sati
CAES	100-300	54%-80%	Minute	Nekoliko sati
NaS baterija	35	80%-85% (DC)	Sekunde	Od minute do sata
Olovna baterija	3-20	75%-80% (DC)	Sekunde	Od minute do sata
Li-ion baterija	0.1-10	90%	Sekunde	Od minute do sata
Superkondenzatori	0.1-10	90%	Sekunde	Sekunde
Zamašnjaci visokih brzina	0.01-10	>85%	Sekunde	Od sekunde do minute

### 3.8.4. Huntorf

Huntorf postrojenje za pohranu energije na komprimirani zrak nalazi se u sjevernoj Njemačkoj u blizini grada Bremena. Huntorf je prvo u svijetu CAES postrojenje i dovedeno je u pogon 1978.



Slika 18. Huntorf postrojenje [3]

Postrojenje ima dvije špilje, od kojih svaka ima volumen od oko  $150,000 \text{ m}^3$ . Obje špilje se koriste tijekom rada postrojenja. Zrak je pohranjen u rasponu između 46 i 66 bara. Huntorf postrojenje se trenutno koristi za uravnoteženje proizvodnje električne energije iz vjetroparkova.

Tablica 4. Tehničke osobine Huntorf postrojenja [3]

<b>Izlaz</b>	
pogon turbine	290 MW
pogon kompresora	60 MW
<b>Protok mase zraka</b>	
Pogon turbine	425 kg/s
Pogon kompresora	108 kg/s
Protok mase zraka ulaz/izlaz	1 / 4
<b>Broj pećina</b>	
	2
Ukupan volumen pećina	300,000 m <sup>3</sup>
Lokacija pećina- vrh	650 m
- dno	800 m
Maksimalni promjer	60 m
Razmak bunara	220 m
<b>Pritisak u pećini</b>	
Najmanji dopušteni	1 bar
Najmanji optimalni	20 bar
Najmanji optimalni (uobičajen)	46 bar
Maksimalni dopušteni	66 bar
Maksimalna dopuštena stopa smanjenja pritiska	15 bar/h

## 4. EKONOMSKA ANALIZA SUSTAVA ZA POHRANU ELEKTRIČNE ENERGIJE

Da bi se napravila ekonomska analiza sustava za pohranu električne energije potrebno je znati potrebnu nazivnu snagu postrojenja koje se gradi, investicijske troškove za izgradnju tog postrojenja, efikasnost postrojenja, godišnje troškove održavanja tog postrojenja te razliku između cijene kupljene i prodane električne energije kako bi se moglo vidjeti je li postrojenje financijski isplativo. Troškove za izgradnju tog postrojenja se računaju pomoću formule:

$$Tcc = S [MW] * Pc \left[ \frac{\text{€}}{KW} \right] + Vs[MWh] * Ec \quad (1)$$

gdje je

S - snaga postrojenja,

Pc –investicijski trošak svih komponenti snage elektrane proporcionalan nazivnoj snazi elektrane,

Vs - veličina spremnika koju dobivamo umnoškom snage postrojenja S i vremenom t koje je potrebno da se taj spremnik isprazni pri nazivnoj snazi postrojenja i računa se prema relaciji (2) ,

Ec – jedinični investicijski trošak spremnika .

$$Vs = S [MW] * t[h] \quad (2)$$

Zatim se računaju godišnji troškovi rada tog postrojenja pomoću formule:

$$OC = VOC \left[ \frac{\text{€}}{MWh} \right] * Heg \left[ \frac{h}{god} \right] * S[MW] + FOC \left[ \frac{\text{€}}{KW} \right] * S[KW] \quad (3)$$

gdje je:

VOC – varijabilni troškovi rada, ova vrijednost je vezana za efikasnost postrojenja i pokazuje koliko se novčanih jedinica troši prilikom procesa pretvorbe energije,

Heg – broj sati u godini kada bi postrojenje radilo sa nazivnom snagom,

S – snaga postrojenja,

FOC – fiksni troškovi rada postrojenja.

Godišnji prihod postrojenja može se izračunati na sljedeći način:

$$prihod = \Delta p \left[ \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right] * Heg \left[ \frac{\text{h}}{\text{god}} \right] * S[\text{MW}] + FOC \left[ \frac{\text{€}}{\text{KW}} \right] * S[\text{KW}] \quad (4)$$

gdje je:  $\Delta p$  – prosječna razlika između cijene prodane i kupljene električne energije.

Kako bi se usporedili različiti načini skladištenja energije, može se izračunati minimalna potrebna razlika cijene  $\Delta p$  kako bi postrojenje bilo na granici isplativosti (ukupan prihod jednak ukupnim troškovima za vrijeme promatranog broja godina):

$$\Delta p = \frac{Tcc + Oc * broj\ god}{S * Heg * broj\ god} [\text{€}] \quad (5)$$

#### 4.1. Primjer izračuna i usporedbe dvaju različitih sustava za pohranu električne energije

U ovom diplomskom radu uspoređivati će se dva sustava za pohranu električne energije, reverzibilna hidroelektrana i sustav za pohranu električne energije na komprimirani zrak. Postrojenja su snage 40 MW koja mogu pri nazivnoj snazi raditi 2 h, 5 h i 10 h.

##### 4.1.1. Sustavi za pohranu električne energije na komprimirani zrak- CAES

Za postrojenje od 40 MW koje ima vrijeme pohrane energije 2 h, 5 h i 10 h treba odrediti koliki su troškovi izgradnje postrojenja na komprimirani zrak, troškove održavanja postrojenja na komprimirani zrak i pri kojoj cjenovnoj razlici treba prodavati električnu energiju da bi se postrojenje isplatilo?

Da bi se izračunali troškovi izgradnje postrojenja prvo se mora odrediti veličina spremnika koja se određuje prema relaciji (2):

a) Za vrijeme pohrane od 2 h

$$Vs = S * t = 40 * 2 = 80 \text{ MWh}$$

Troškove izgradnje postrojenja na komprimirani zrak računaju se pomoću relacije (1):

$$\begin{aligned} Tcc &= S * Pc + Vs * Ec = 40\ 000 * 400 + 80\ 000 * 10 = 16\ 000\ 000 + 800\ 000 \\ &= 16\ 800\ 000 \text{ €} \end{aligned}$$

gdje se za vrijednosti  $Pc$  i  $Ec$  iščitavaju iz tablice 5:

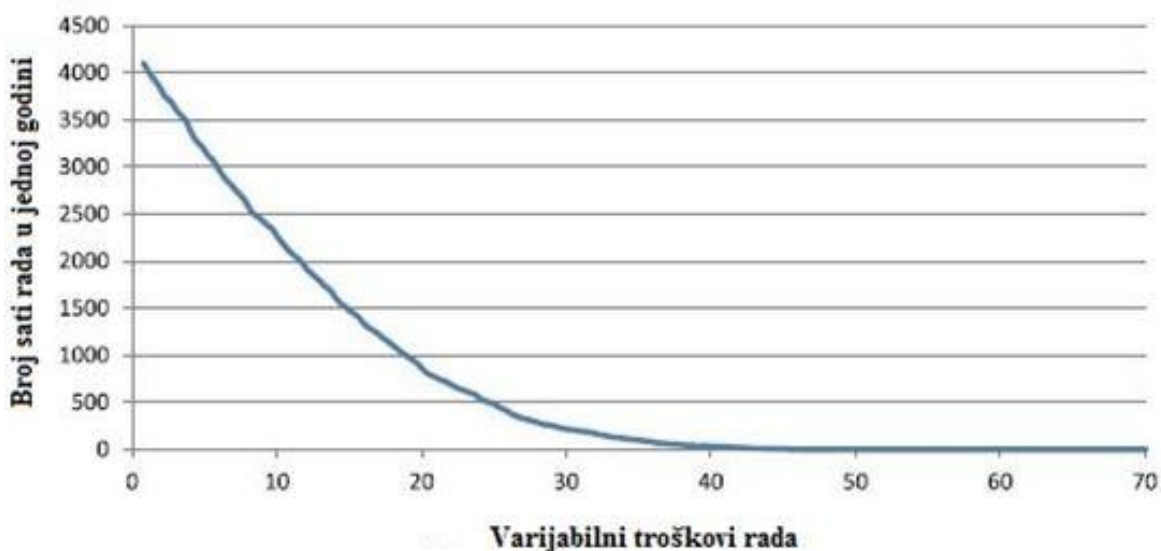
Tablica 5. Trošak tehnologija skladištenja [4]

	PHS	Napredni PHS	CAES	AACAES
Pc [£/KW]	1200	180	300 – 500	300 – 500
Ec [£/KWh]	25 – 145	-	0.6 – 18	3 – 40
VOC [£/ MWh]	6.3	6.3	15.8	13
FOC [£/KW * broj god]	7.04	7.04	9.51	9.51
Životni vijek	60	60	35	35

Kada se izračunaju troškovi izgradnje postrojenja potrebno je izračunati troškove rada tog postrojenja kroz jednu godinu koje određujemo pomoću relacije (3)

$$\begin{aligned}
 OC &= VOC * Heg * S + FOC * S = 15.8 * 1400 * 40 + 9.51 * 40\ 000 \\
 &= 884\ 800 + 380\ 400 = 1265200 \text{ £}
 \end{aligned}$$

gdje se vrijednosti za VOC i FOC uzimaju iz tablice 4. dok se za godišnji broj sati u kojem postrojenje radi punim kapacitetom iščitava iz dijagrama sa slike 19.



Slika 19. Usporedba varijabilnih troškova sa brojem sati rada u jednoj godini [4]



Kada se odrede troškovi izgradnje postrojenja i troškovi održavanja postrojenja prema relaciji (4) određuje se prosječna razlika između cijene kupljene i prodane električne energije da bi postrojenje bilo isplativo.

$$\Delta p = \frac{T_{cc} + OC * broj\ god}{S * Heg * broj\ god} = \frac{16\ 800\ 000 + 1265200 * 35}{40 * 1400 * 35} = \frac{61082000}{1960000} = 31.16\ \text{£/MWh}$$

b ) Za vrijeme od 5 h

$$V_s = S * t = 40 * 5 = 200\ \text{MWh}$$

Troškove izgradnje postrojenja na komprimirani zrak računaju se pomoću relacije (1) :

$$\begin{aligned} T_{cc} &= S * P_c + V_s * E_c = 40\ 000 * 400 + 200\ 000 * 10 = 16\ 000\ 000 + 2\ 000\ 000 \\ &= 18\ 000\ 000\ \text{£} \end{aligned}$$

gdje se za vrijednosti  $P_c$  i  $E_c$  iščitavaju iz tablice 5.

Kad se izračunaju troškovi izgradnje postrojenja potrebno je izračunati troškove rada tog postrojenja kroz jednu godinu koje određujemo pomoću relacije (3)

$$\begin{aligned} OC &= VOC * Heg * S + FOC * S = 15.8 * 1400 * 40 + 9.51 * 40\ 000 \\ &= 884\ 800 + 380\ 400 = 1265200\ \text{£} \end{aligned}$$

gdje se vrijednosti za  $VOC$  i  $FOC$  uzimaju iz tablice 5. dok se za godišnji broj sati u kojem postrojenje radi punim kapacitetom iščitava iz dijagrama sa slike 19.

Kada se odrede troškovi izgradnje postrojenja i troškovi održavanja postrojenja prema relaciji (4) određuje se prosječna razlika između cijene kupljene i prodane električne energije da bi postrojenje bilo isplativo.

$$\Delta p = \frac{T_{cc} + OC * broj\ god}{S * Heg * broj\ god} = \frac{18\ 000\ 000 + 1265200 * 35}{40 * 1400 * 35} = \frac{62282000}{1960000} = 31.77\ \text{£/MWh}$$

c ) Za vrijeme od 10 h

$$Vs = S * t = 40 * 10 = 400 MWh$$

Troškove izgradnje postrojenja na komprimirani zrak računaju se pomoću relacije ( 1 ) :

$$\begin{aligned} Tcc &= S * Pc + Vs * Ec = 40\ 000 * 400 + 400\ 000 * 10 = 16\ 000\ 000 + 4\ 000\ 000 \\ &= 20\ 000\ 000 \text{ £} \end{aligned}$$

gdje se za vrijednosti Pc i Ec iščitavaju iz tablice 5.

Kad se izračunaju troškovi izgradnje postrojenja potrebno je izračunati troškove rada tog postrojenja kroz jednu godinu koje određujemo pomoću relacije (3)

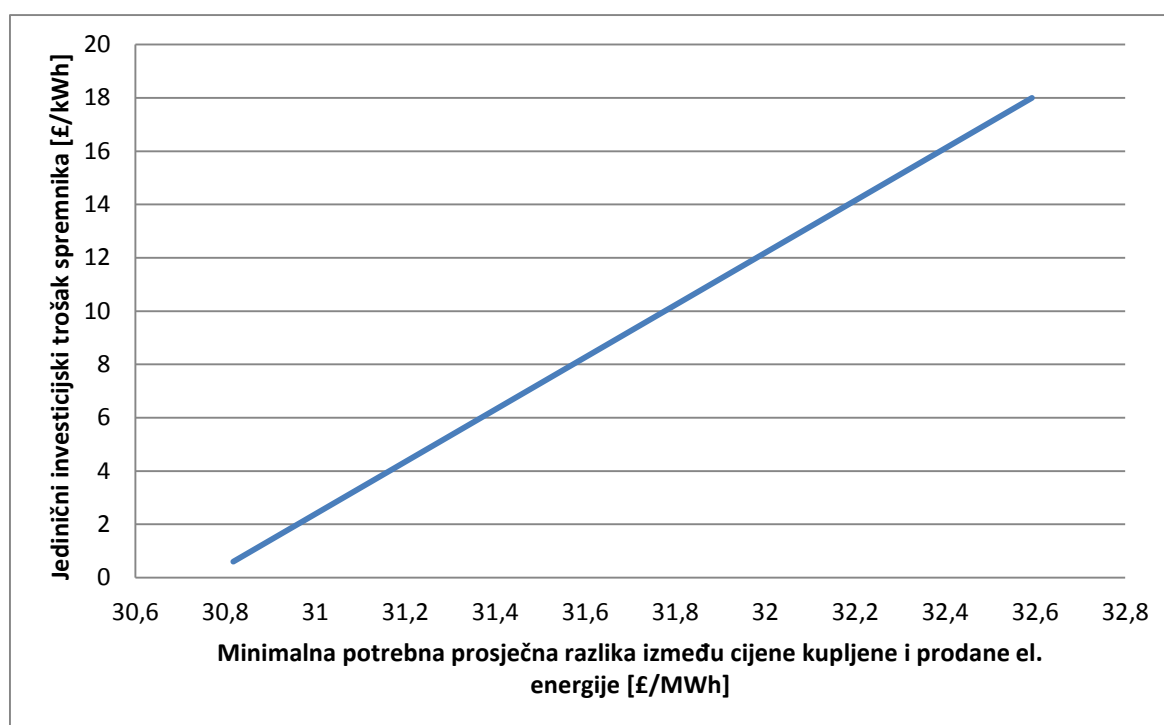
$$\begin{aligned} OC &= VOC * Heg * S + FOC * S = 15.8 * 1400 * 40 + 9.51 * 40\ 000 \\ &= 884\ 800 + 380\ 400 = 1265200 \text{ £} \end{aligned}$$

Gdje se vrijednosti za VOC i FOC uzimaju iz tablice 5. dok se za godišnji broj sati u kojem postrojenje radi punim kapacitetom iščitava iz dijagrama sa slike 19.

Kada se odrede troškovi izgradnje postrojenja i troškovi održavanja postrojenja prema relaciji (4) određuje se prosječna razlika između cijene kupljene i prodane električne energije da bi postrojenje bilo isplativo.

$$\Delta p = \frac{Tcc + OC * broj\ god}{S * Heg * broj\ god} = \frac{20\ 000\ 000 + 1265200 * 35}{40 * 1400 * 35} = \frac{64282000}{1960000} = 32.79 \text{ £/MWh}$$

Dodatno, napravljena je analiza osjetljivosti potrebne minimalne razlike cijene kupljene i prodane električne energije s obzirom na raspon jediničnog investicijskog troška spremnika (ovisno o tipu spremnika) prema ulaznim podacima navedenim u tablici 5. Zbog toga, napravljen je model u programu Microsoft Office Excel. Na slici 20 prikazan je dijagram koji prikazuje ovisnost minimalno potrebne prosječne razlike cijene između kupljene i prodane energije i jediničnog investicijskog troška spremnika za različite tipove terena na kojima se spremnici za pohranu energije mogu graditi.



Slika 20. Odnos između  $\Delta p$  i  $E_c$  za CAES

#### 4.1.2. Reverzibilne hidroelektrane

Za postrojenje od 40 MW za vrijeme pohrane od 2h, 5h, 10h treba odrediti koliki su troškovi izgradnje reverzibilne hidroelektrane, troškove održavanja reverzibilne hidroelektrane i pri kojoj cjenovnoj razlici treba prodavati električnu energiju da bi se postrojenje isplatilo?

Da bi se izračunali troškovi izgradnje postrojenja prvo se mora odrediti veličina spremnika koju određujemo prema relaciji (2):

a ) Za vrijeme od 2 h

$$Vs = S * t = 40 * 2 = 80 \text{ MWh}$$

Troškove izgradnje reverzibilne hidroelektrane se računaju pomoću relacije ( 1 ) :

$$Tcc = S * Pc + Vs * Ec = 40\ 000 * 1200 + 80\ 000 * 50 = 52\ 000\ 000 \text{ £}$$

gdje se vrijednosti za  $Pc$  i  $Ec$  iščitavaju iz tablice 5. Kad se izračunaju troškovi izgradnje postrojenja potrebno je izračunati troškove rada tog postrojenja kroz jednu godinu koje se određuje pomoću relacije (3):

$$OC = VOC * Heg * S + FOC * S = 6.3 * 3000 * 40 + 7.04 * 40\ 000 = 756\ 000 + 281\ 600 \\ = 1\ 037\ 600 \text{ £}$$

gdje se vrijednosti za  $VOC$  i  $FOC$  uzimaju iz tablice 5., dok se za godišnji broj sati u kojem postrojenje radi punim kapacitetom iščitava iz dijagrama na slici 19. Kada se odrede troškovi izgradnje postrojenja i troškovi rada postrojenja, prema relaciji (4) određuje se prosječna razlika između cijene kupljene i prodane električne energije da bi postrojenje bilo isplativo.

$$\Delta p = \frac{Tcc + OC * broj\ god}{S * Heg * broj\ god} = \frac{52\ 000\ 000 + 62\ 256\ 000}{40 * 3000 * 60} = \frac{114\ 256\ 000}{720\ 000} = 15.86 \text{ £/MWh}$$

b ) Za vrijeme od 5 h

$$Vs = S * t = 40 * 5 = 200 \text{ MWh}$$

Troškove izgradnje reverzibilne hidroelektrane računamo pomoću relacije ( 1 ) :

$$Tcc = S * Pc + Vs * Ec = 40\ 000 * 1200 + 200\ 000 * 50 = 58\ 000\ 000 \text{ £}$$

gdje se vrijednosti za  $Pc$  i  $Ec$  iščitavaju iz tablice 5. Kad se izračunaju troškovi izgradnje postrojenja potrebno je izračunati troškove rada tog postrojenja kroz jednu godinu koji se određuju pomoću relacije (3),

$$OC = VOC * Heg * S + FOC * S = 6.3 * 3000 * 40 + 7.04 * 40\ 000 = 756\ 000 + 281\ 600 \\ = 1\ 037\ 600 \text{ £}$$

gdje se vrijednosti za VOC i FOC uzimaju iz tablice 5, dok se za godišnji broj sati u kojem postrojenje radi punim kapacitetom iščitava iz dijagrama na slici 19. Kada se odrede troškovi izgradnje postrojenja i troškovi održavanja postrojenja prema relaciji (4) određuje se prosječna razlika između cijene kupljene i prodane električne energije da bi postrojenje bilo isplativo.

$$\Delta p = \frac{Tcc + OC * broj\ god}{S * Heg * broj\ god} = \frac{58\ 000\ 000 + 62\ 256\ 000}{40 * 3000 * 60} = \frac{120256000}{7200000} = 16.70\ \text{£/MWh}$$

c ) Za vrijeme od 10 h

$$Vs = S * t = 40 * 10 = 400\ \text{MWh}$$

Troškove izgradnje reverzibilne hidroelektrane računamo pomoću relacije (1) :

$$Tcc = S * Pc + Vs * Ec = 40\ 000 * 1200 + 400\ 000 * 50 = 68\ 000\ 000\ \text{£}$$

Gdje se vrijednosti za Pc i Ec iščitavaju iz tablice 5 . Kad se izračunaju troškovi izgradnje postrojenja potrebno je izračunati troškove rada tog postrojenja kroz jednu godinu koji se određuju pomoću relacije (3):

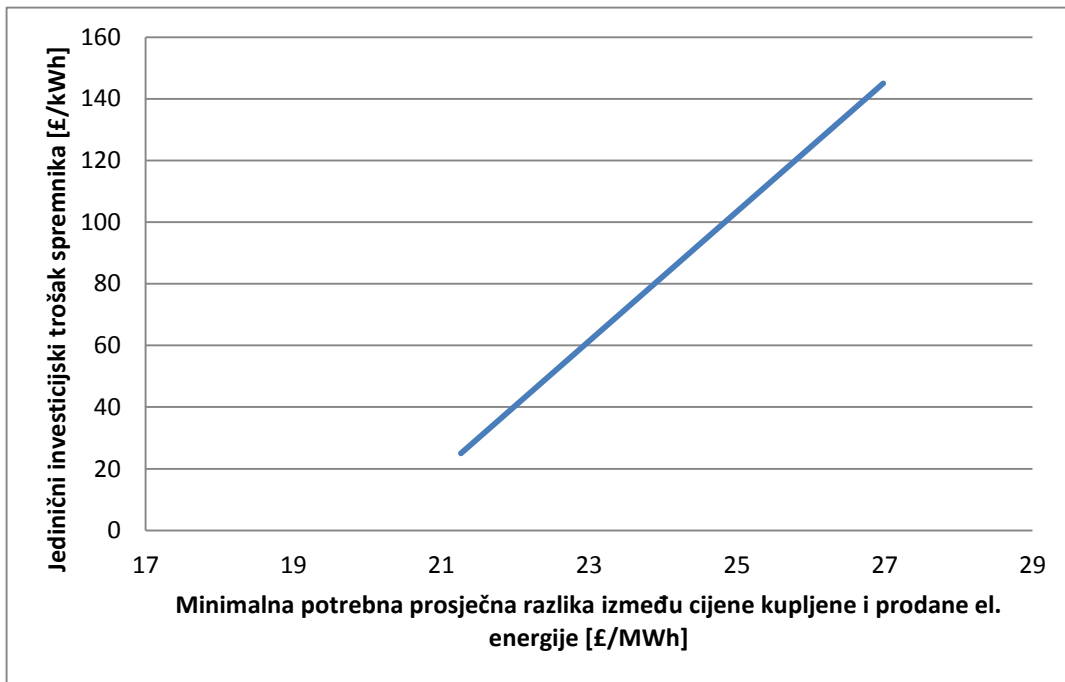
$$OC = VOC * Heg * S + FOC * S = 6.3 * 3000 * 40 + 7.04 * 40\ 000 = 756\ 000 + 281\ 600 \\ = 1\ 037\ 600\ \text{£}$$

gdje se vrijednosti za VOC i FOC uzimaju iz tablice 5. dok se za godišnji broj sati u kojem postrojenje radi punim kapacitetom iščitava iz dijagrama na slici 19. Kada se odrede troškovi izgradnje postrojenja i troškovi održavanja postrojenja prema relaciji ( 4 ) određuje se prosječna razlika između cijene kupljene i prodane električne energije da bi postrojenje bilo isplativo.

$$\Delta p = \frac{Tcc + OC * broj\ god}{S * Heg * broj\ god} = \frac{68\ 000\ 000 + 62\ 256\ 000}{40 * 3000 * 60} = \frac{130256000}{7200000} = 18.09\ \text{£/MWh}$$

Dodatno, napravljena je analiza osjetljivosti potrebne minimalne razlike cijene kupljene i prodane električne energije s obzirom na raspon jediničnog investicijskog troška spremnika prema ulaznim podacima navedenim u tablici 5. Zbog toga, napravljen je model u programu Microsoft Office Excel.

Na slici 21 prikazan je dijagram koji prikazuje ovisnost minimalno potrebne prosječne razlike cijene između kupljene i prodane energije i jediničnog investicijskog troška spremnika.



Slika 21. Odnos između  $\Delta p$  i  $E_c$  za reverzibilnu hidroelektranu

## 5. ZAKLJUČAK

Danas imamo širok izbor tehnologija za skladištenje električne energije, radilo se o mehaničkim, (elektro)kemijskim ili fizičkim principima, zbog čega imamo i široki spektar performansi i kapaciteta za različita područja i primjene. Ekonomska izvedba je kritičan čimbenik u izgradnji dodatnih kapaciteta za pohranu u odnosu na alternativu.. U ovom diplomskom radu uspoređene su različite tehnologije za pohranu električne energije i napravljena je ekonomska analiza reverzibilnih hidroelektrana i sustava za pohranu električne energije na komprimirani zrak. Reverzibilne hidroelektrane danas imaju veliku ulogu u stabilizaciji frekvencije i napona u elektroenergetskom sustavu koje nam pomažu tako što uzimaju energiju od elektroenergetskog sustava kada potražnja za energijom nije velika, te isto daju energiju u sustav kada je ona najpotrebnija tj. kada potražnja za energijom poraste. Nedostatak ovog sustava je u tome što je investicija velika i rok otplate uložениh sredstava relativno dug i predstavlja glavnu prepreku privatnim investitorima kojima je na prvom mjestu brza zarada. Sustavi za pohranu električne energije na komprimirani zrak CAES je relativno nova tehnologija koja radi na principu komprimiranja zraka u spremnike koji se najčešće nalaze ispod zemlje. Cijenu sustava za pohranu električne energije na komprimirani zrak uvelike diktira mjesto na kojemu je postrojenje napravljeno. Za izgradnju spremnika zraka mora se u obzir uzet formacija tla i treba li se za spremnik zraka kopati nove pećine ili se koriste već postojeće. Iz rezultata ekonomske analize možemo vidjeti da je ekonomski isplativije reverzibilne hidroelektrane u odnosu na CAES sustava budući da je minimalna potrebna razlika cijene između kupljene i prodane električne energije manja za reverzibilne hidroelektrane u odnosu na CAES sustav.

## 6. LITERATURA

- [1] Simić, J., Reverzibilne hidroelektrane, Infoteh Jahorina, Vol.11, 2012, pp. 1081-1085
- [2] Akumulacija energije, Univerzitet Singidunum Srbija, prezentacija s predavanja, dostupno na:  
[http://predmet.singidunum.ac.rs/pluginfile.php/2627/mod\\_folder/content/1/PEE5\\_2k13.pdf?forcedownload=1](http://predmet.singidunum.ac.rs/pluginfile.php/2627/mod_folder/content/1/PEE5_2k13.pdf?forcedownload=1) ( pristupljeno 27.5.2016.)
- [3] Riaz, M. A., Feasibility of compressed air energy storage to store wind on monthly and daily basis, Iowa State University, 2010
- [4] Locatelli, G.,Palerma, M., Mancini, M., Assessing the economics of large Energy Storage Plants with an optimisation methodology, University of Lincoln, Energy 83 (2015), pp. 15-28
- [5] Skladištenje energije, Energetske tehnologije, FER Zagreb, 2015, prezentacija sa predavanja, dostupno na:  
[https://www.fer.unizg.hr/download/repository/ET14\\_Skladistenje\\_energije.pdf](https://www.fer.unizg.hr/download/repository/ET14_Skladistenje_energije.pdf)  
(pristupljeno 5.6.2016.)
- [6] Proizvodnja i distribucija komprimiranog zraka, FER Zagreb, prezentacija sa predavanja, dostupno na:  
[https://www.fer.unizg.hr/download/repository/GEEU\\_9\\_Skripta\\_kompresori%5B1%5D.pdf](https://www.fer.unizg.hr/download/repository/GEEU_9_Skripta_kompresori%5B1%5D.pdf) (pristupljeno 7.6.2016)
- [7] Mogućnosti pohrane energije, službena stranica portal croenergo.eu, dostupno na:  
<http://www.croenergo.eu/mogucnosti-pohrane-energije-396.aspx> (pristupljeno 3.6.2016.)
- [8] Babić, M., Sustavi na komprimirani zrak, seminarski rad, Elektrotehnički fakultet Osijek, 2015
- [9] Reverzibilne hidroelektrane, FER Zagreb, prezentacija s predavanja, dostupno na:  
[https://www.fer.unizg.hr/download/repository/02\\_Reverzibilne\\_hidroelektrane.pdf](https://www.fer.unizg.hr/download/repository/02_Reverzibilne_hidroelektrane.pdf)  
(pristupljeno: 25.5.2016.)
- [10] Lončar, j., Superkondenzatori, Seminarski rad, FER Zagreb, 2013



## 7. SAŽETAK

U ovome diplomskom radu prikazana je ekonomska analiza sustava za pohranu energije. Nakon uvoda, definirane su osnovne karakteristike tehnologija za pohranu električne energije. U trećem poglavlju prikazane su karakteristike pojedinih tehnologija za pohranu energije. U četvrtom poglavlju napravljena je usporedna ekonomska analiza isplativosti reverzibilne hidroelektrane i sustava za pohranu energije komprimiranim zrakom (CAES). U zadnjem poglavlju dan je zaključak rada.

**Ključne riječi:** Sustavi za pohranu električne energije, komprimirani zrak, reverzibilne hidroelektrane, baterije, superkondenzator, skladištenje vodikom

## 8. ABSTRACT

In this paper is presented an economic analysis system for energy storage. After the introduction, the basic characteristics of the technology for electricity storage are defined. In the third chapter characteristics of specific technologies for energy storage are presented. In the fourth chapter, a comparative economic analysis of the viability of pumped hydro storage and storage systems with compressed air energy (CAES) is conducted. The last chapter presents the final conclusion of the paper.

**Keywords:** Storage of electricity, compressed air, pumped hydro, batteries, super-cap , hydrogen storage

## 9. ŽIVOTOPIS

Hrvoje Čaldarević je rođen 4. srpnja 1990. u Slavonskom Brodu, a živi u Oriovcu gdje je završio Osnovnu školu. U rujnu 2005. godine upisuje se u srednju školu Tehnička škola Slavonski Brod, smjera Tehničar za elektroenergetiku koju završava u lipnju 2009. Nakon završetka srednje škole i položene mature 2009. Godine upisuje se na Elektrotehnički fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku na stručni studij Elektrotehnike, smjera Elektroenergetika. Isti završava u rujnu 2012. godine, te iste godine upisuje Razlikovne obveze na Elektrotehničkom fakultetu Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, koje završava 2013. godine, nakon čega ostvaruje potrebne uvjete za upis diplomskog studija na Elektrotehničkom fakultetu Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.