

Model za optimizaciju rada spremišta energije u tržišno orijentiranom elektroenergetskom sustavu

Mandić, Marin

Doctoral thesis / Disertacija

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:179:602510>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-28**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture - University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Marin Mandić

**MODEL ZA OPTIMIZACIJU RADA SPREMIŠTA
ENERGIJE U TRŽIŠNO ORIJENTIRANOM
ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Split, 2023.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Marin Mandić

*Model za optimizaciju rada spremišta energije u tržišno
orijentiranom elektroenergetskom sustavu*

DOKTORSKA DISERTACIJA

Split, 2023.

Doktorska disertacija je izrađena na Zavodu za elektroenergetiku,
Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje

Mentor: Prof. dr. sc. Elis Sutlović

Rad br. 192

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

Ključne riječi: Model spremišta energije, optimizacija rada spremišta energije, kombinirano cjelobrojno linearno programiranje, tržišta električne energije, energetska arbitraža, integracija obnovljivih izvora energije.

Znanstveno područje: tehničke znanosti

Znanstveno polje: elektrotehnika

Znanstvena grana: elektroenergetika

Institucija na kojoj je rad izrađen: Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje

Mentor rada: Prof. dr. sc. Elis Sutlović

Broj stranica: 127

Broj slika: 47

Broj tablica: 38

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 149

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:

1. izv. prof. dr. sc. Tonći Modrić, FESB, Split
2. prof. dr. sc. Nikša Kovač, FESB, Split
3. prof. dr. sc. Goran Petrović, FESB, Split
4. prof. dr. sc. Ivica Jurić-Grgić, FESB, Split
5. naslovni doc. dr. sc. Goran Majstrovic, Energetski institut „Hrvoje Požar“, Zagreb

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:

1. izv. prof. dr. sc. Tonći Modrić, FESB, Split
2. prof. dr. sc. Nikša Kovač, FESB, Split
3. prof. dr. sc. Goran Petrović, FESB, Split
4. prof. dr. sc. Ivica Jurić-Grgić, FESB, Split
5. naslovni doc. dr. sc. Goran Majstrovic, Energetski institut „Hrvoje Požar“, Zagreb

Disertacija obranjena dana: 26. rujna 2023.

Model za optimizaciju rada spremišta energije u tržišno orijentiranom elektroenergetskom sustavu

Sažetak:

Budući da potreba za električnom energijom konstantno raste, svijet se sve više orijentira na proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora, posebno iz vjetra i sunca (fluktuirajućeg karaktera) čiji udio sve više raste. Liberalizacija tržišta te razne svjetske krize mogu dovesti do varijacije cijena električne energije. Jedno od rješenja postizanja sigurnijeg i pouzdanijeg elektroenergetskog sustava zbog prisutnosti visokog udjela fluktuirajuće energije te poboljšanja zbog nestabilnosti cijena električne energije je korištenje spremišta energije. Potrebno je razviti učinkovite metode za optimiziranje rada spremišta u svrhu ostvarivanja željenog cilja.

U ovoj doktorskoj disertaciji razvijen je model za optimizaciju rada spremišta u tržišno orijentiranom elektroenergetskom sustavu. Model se ne bavi specifičnostima pojedine tehnologije već optimizira rad spremišta prvenstveno za dnevni ciklus punjenja i pražnjenja. Model je razvijen u optimizacijskoj tehnici kombiniranog cjelobrojnog linearnog programiranja. Razvojem općeg modela želi se omogućiti korisniku izvođenje raznih simulacija i optimizacija spremišta energije u tržišnim uvjetima poput optimizacije samog spremišta, spremišta i nekih dodatnih izvora te cjelokupnog sustava sa svim izvorima energije. Model uzima u obzir rad ostalih najčešće korištenih proizvodnih postrojenja tako što je modeliran rad po jednog proizvodnog postrojenja koje se smatra aproksimacijom svih ostalih proizvodnih postrojenja tog istog tipa.

Primjenjivost razvijenog modela prikazana je kroz četiri grupe proračuna. U prvoj grupi proračuna se istraživao utjecaj jednog parametra spremišta na optimalni režim rada spremišta. U drugoj grupi se pokazalo kako spremište utječe na smanjenje troška zbog neisporučene energije proizvodnih kompanija. Treća grupa proračuna analizirala je utjecaj veličine spremišta na rad cjelokupnog sustava. U četvrtoj grupi proračuna je istraživao utjecaj strukture elektroenergetskog sustava na rad spremišta, odnosno povećanja udjela proizvodnje akumulacijskih HE i udjela proizvodnje intermitentnih obnovljivih izvora energije.

Ključne riječi: Model spremišta energije, optimizacija rada spremišta energije, kombinirano cjelobrojno linearno programiranje, tržišta električne energije, energetska arbitraža, integracija obnovljivih izvora energije.

Optimization model for energy storage operation in a market-oriented power system

Abstract:

As the electricity demand constantly grows, the world is increasingly focusing on generating electrical energy from renewable sources, especially from wind and sun (fluctuating characteristic), whose share is continuously increasing. Additionally, market liberalization and various global crises can cause electricity prices fluctuations. One of the solutions to achieve a more secure and reliable power system due to the presence of a high share of fluctuating energy and the improvement due to electricity price volatility, is the energy storage use. In addition, it is necessary to develop efficient methods for optimizing the energy storage operation in order to achieve the desired goal.

In this doctoral dissertation, a optimization model for energy storage operation in a market-oriented power system, is developed. The model does not focus on the specifics of individual technology, but optimizes the storage operation primarily for the daily charging and discharging cycle. The model was developed using the optimization technique of mixed-integer linear programming. The development of the general model aims to enable the user can make various simulations and optimizations of the energy storage in a market conditions, such as the optimization of the storage system only, the energy storage with some additional production sources and the overall system with all production sources. The model takes into account the operation of other commonly used production plants by modeling the operation of a single representative production plant that approximates of all other plants of the same type.

The applicability of the developed model is presented through four groups of calculations. In the first group of calculations, the influence of one storage parameter on the storage optimal operating mode, was investigated. In the second group, it was shown what influence the energy storage has on the reduction of costs, due to the undelivered energy of production companies. The third group have analysed the impact of energy storage size on the operation of the overall system. The fourth group of the calculations have investigated the influence of the power system structure on the energy storage operation, specifically the increase in the share of storage hydropower plants production and the share of intermittent renewable energy production.

Keywords: Energy storage model, optimization of energy storage operation, mixed integer linear programming (MILP), electricity markets, energy arbitrage, integration of renewable energy sources

Zahvala

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Elisu Sutloviću te kolegi izv.prof.dr.sc. Tonću Modriću na pruženoj neizmjernoj pomoći tijekom izrade doktorske disertacije.

Sadržaj

Sažetak	iv
Abstract	v
Zahvala.....	vi
Sadržaj.....	vii
Popis tablica	ix
Popis slika	xi
Popis kratica.....	xiv
1. UVOD.....	1
1.1. Motivacija	1
1.2. Pregled dosadašnjih istraživanja	3
1.2.1. Tehnologije spremanja energije.....	3
1.2.2. Istraživanja optimizacije rada spremišta u elektroenergetskom sustavu.....	17
1.3. Hipoteza.....	28
1.4. Očekivani znanstveni doprinosi	29
1.5. Pregled strukture disertacije.....	29
2. OPIS MODELA ZA OPTIMIZACIJU RADA SPREMIŠTA ENERGIJE	31
2.1. Funkcija cilja.....	34
2.2. Ograničenja.....	37
2.2.1. Ograničenja na tokove energija spremišta	37
2.2.2. Ograničenja na tokove energija ostalih proizvodnih jedinica u sustavu	44
2.2.3. Ograničenja na plasman energije na tržištu pomoćnih usluga	49
2.2.4. Ograničenja na tokove energija cjelokupnog sustava	50
2.3. Nomenklatura korištena u modelu	51
3. PRIMJENA MODELA ZA OPTIMIZACIJU RADA SPREMIŠTA ENERGIJE	56

3.1.	Podaci korišteni u primjerima	57
3.2.	Utjecaj koeficijenta učinkovitosti (η) na optimalni režim rada spremišta	65
3.3.	Utjecaj spremišta na smanjenje troška zbog neisporučene energije proizvodnih kompanija	70
3.4.	Utjecaj veličine spremišta na EES	82
3.5.	Utjecaj strukture EES-a na rad spremišta.....	95
3.5.1.	Povećanje udjela proizvodnje akumulacijske HE	96
3.5.2.	Povećanje udjela proizvodnje IOIE	104
4.	ZAKLJUČAK.....	114
	LITERATURA.....	116
	Životopis	126
	Curriculum Vitae.....	127

Popis tablica

Tablica 3.1 Vrijednosti parametara spremišta za osnovni slučaj	57
Tablica 3.2 Vrijednosti parametara parne TE.....	60
Tablica 3.3 Vrijednosti parametara plinske TE	60
Tablica 3.4 Vrijednosti parametara kogeneracijske TE.....	61
Tablica 3.5 Vrijednosti parametara protočne HE	61
Tablica 3.6 Vrijednosti parametara akumulacijske HE	61
Tablica 3.7 Godišnji postotni udio energija proizvodnih jedinica te uvoza i izvoza	65
Tablica 3.8 Energije i snage spremišta u slučaju promjene η	66
Tablica 3.9 Sati rada RHE i angažirana snaga u slučaju promjene η	66
Tablica 3.10 Prihodi, troškovi pogona i dobit RHE u slučaju promjene η	67
Tablica 3.11 Parametri spremišta koji se mijenjaju u simulaciji u slučaju GENCO-a	70
Tablica 3.12 Energije i snage proizvodnje spremišta u slučaju GENCO-a	72
Tablica 3.13 Sati rada spremišta u slučaju GENCO-a.....	73
Tablica 3.14 Prihodi, troškovi pogona i dobit GENCO-a	73
Tablica 3.15 Iznos ukupne energije penala (MWh) i trošak penala (€).....	75
Tablica 3.16 Parametri RHE koji se mijenjaju u simulaciji u slučaju povećanja veličine spremišta	82
Tablica 3.17 Energije RHE i ostalih proizvođača te snage pomoćnih usluga RHE u slučaju povećanja veličine spremišta.....	84
Tablica 3.18 Sati rada RHE i ostalih proizvođača u slučaju povećanja veličine spremišta	85
Tablica 3.19 Angažirana snaga RHE (%) u slučaju povećanja veličine spremišta.....	86
Tablica 3.20 Prihodi i troškovi pogona RHE u slučaju povećanja veličine spremišta.....	87
Tablica 3.21 Prihodi, trošak rada i trošak pokretanja ostalih proizvođača u slučaju povećanja veličine spremišta.....	88
Tablica 3.22 Dobit cjelokupnog sustava (€) u slučaju povećanja veličine spremišta	89

Tablica 3.23 Suma vršnih snaga (MW) svih proizvođača u slučaju povećanja veličine spremišta	89
Tablica 3.24 Analiza troška RHE (€) u slučaju povećanja veličine spremišta	90
Tablica 3.25 Parametri sustava koji se mijenjaju u simulacijama u slučaju povećanja udjela proizvodnje akumulacijske HE	96
Tablica 3.26 Energije RHE i ostalih proizvođača te snage pomoćnih usluga RHE u slučaju povećanja udjela proizvodnje akumulacijske HE.....	98
Tablica 3.27 Sati rada RHE i ostalih proizvođača u slučaju povećanja udjela proizvodnje akumulacijske HE	99
Tablica 3.28 Angažirana snaga RHE (%) u slučaju povećanja udjela proizvodnje akumulacijske HE	100
Tablica 3.29 Prihodi i troškovi pogona RHE u slučaju povećanja udjela proizvodnje akumulacijske HE	100
Tablica 3.30 Prihodi, trošak rada i trošak pokretanja ostalih proizvođača u slučaju povećanja udjela proizvodnje akumulacijske HE.....	101
Tablica 3.31 Dobit cjelokupnog sustava (€) u slučaju povećanja udjela proizvodnje akumulacijske HE	101
Tablica 3.32 Parametri sustava koji se mijenjaju u simulacijama u slučaju povećanja proizvodnje IOIE.....	104
Tablica 3.33 Energije RHE i ostalih proizvođača te snage pomoćnih usluga RHE u slučaju povećanja proizvodnje IOIE.....	106
Tablica 3.34 Sati rada RHE i ostalih proizvođača u slučaju povećanja proizvodnje IOIE	107
Tablica 3.35 Angažirana snaga RHE (%)u slučaju povećanja proizvodnje IOIE.....	108
Tablica 3.36 Prihodi, troškovi pogona te dobit RHE u slučaju povećanja proizvodnje IOIE	108
Tablica 3.37 Prihodi, trošak rada i trošak pokretanja ostalih proizvođača u slučaju povećanja proizvodnje IOIE.....	109
Tablica 3.38 Dobit cjelokupnog sustava (€) u slučaju povećanja proizvodnje IOIE.....	109

Popis slika

Slika 1.1 Shema RHE.....	4
Slika 1.2 Princip rada Li-ion baterije (pražnjenje)	6
Slika 1.3 NaS baterija.....	8
Slika 1.4 Olovna baterija.....	9
Slika 1.5 Princip rada redoks protočne baterije.....	10
Slika 1.6 SMES tehnologija	12
Slika 1.7 Superkondenzator.....	13
Slika 1.8 Shematski prikaz zamašnjaka.....	15
Slika 1.9 Shema CAES postrojenja.....	16
Slika 2.1 Shema tokova energije prilikom rada spremišta.....	38
Slika 2.2 Shema akumulacijske HE	47
Slika 2.3 Cjelokupni modelirani sustav.....	51
Slika 3.1 Dotok u gornji i donji bazen RHE.....	58
Slika 3.2 Vjerojatnost proizvodnje spremišta u regulaciji prema gore.....	59
Slika 3.3 Vjerojatnost proizvodnje spremišta u regulaciji prema dolje.....	59
Slika 3.4 Vjerojatnost proizvodnje spremišta u havarijskoj rezervi	60
Slika 3.5 Godišnji niz izmjerenih srednjih dnevnih dotoka u HE.....	62
Slika 3.6 Tjedna proizvodnja FNE.....	63
Slika 3.7 Tjedna proizvodnja VE	63
Slika 3.8 Tjedni prikaz ukupnog opterećenja EES-a Hrvatske.....	64
Slika 3.9 Cijene energije sa CROPEX-a na DAM tržištu	65
Slika 3.10 Energije RHE u slučaju promjene η	67
Slika 3.11 Sati rada RHE u slučaju promjene η	68
Slika 3.12 Prihodi od različitih usluga RHE u slučaju promjene η	68
Slika 3.13 Troškovi pogona RHE u slučaju promjene η	69

Slika 3.14 Energije baterije, FNE i VE u slučaju GENCO-a	75
Slika 3.15 Energije RHE, FNE i VE u slučaju GENCO-a	76
Slika 3.16 Snage pomoćnih usluga baterije u slučaju GENCO-a.....	76
Slika 3.17 Snage pomoćnih usluga RHE u slučaju GENCO-a.....	77
Slika 3.18 Sati rada baterije, FNE i VE u slučaju GENCO-a.....	77
Slika 3.19 Sati rada RHE, FNE i VE u slučaju GENCO-a.....	78
Slika 3.20 Prihodi baterije, FNE i VE u slučaju GENCO-a	78
Slika 3.21 Prihodi RHE, FNE i VE u slučaju GENCO-a	79
Slika 3.22 Troškovi pogona baterije u slučaju GENCO-a.....	79
Slika 3.23 Troškovi pogona RHE u slučaju GENCO-a.....	80
Slika 3.24 Dobit GENCO-a.....	80
Slika 3.25 Energija penala GENCO-a.....	81
Slika 3.26 Trošak penala GENCO-a	81
Slika 3.27 Energije RHE u slučaju povećanja veličine spremišta	91
Slika 3.28 Energije ostalih proizvođača u slučaju povećanja veličine spremišta	91
Slika 3.29 Sati rada RHE u slučaju povećanja veličine spremišta.....	92
Slika 3.30 Sati rada ostalih proizvođača u slučaju povećanja veličine spremišta.....	92
Slika 3.31 Prihodi RHE u slučaju povećanja veličine spremišta	93
Slika 3.32 Prihodi ostalih proizvođača u slučaju povećanja veličine spremišta	93
Slika 3.33 Troškovi rada ostalih proizvođača u slučaju povećanja veličine spremišta....	94
Slika 3.34 Suma vršnih snaga svih proizvođača u slučaju povećanja veličine spremišta	94
Slika 3.35 Analiza troška RHE.....	95
Slika 3.36 Energije RHE u slučaju povećanja udjela proizvodnje akumulacijske HE ..	102
Slika 3.37 Energije ostalih proizvođača u slučaju povećanja udjela proizvodnje akumulacijske HE	102
Slika 3.38 Sati rada ostalih proizvođača u slučaju povećanja udjela proizvodnje akumulacijske HE	103

Slika 3.39 Prihodi ostalih proizvođača u slučaju povećanja udjela proizvodnje akumulacijske HE	103
Slika 3.40 Ukupna dobit cjelokupnog sustava u slučaju povećanja udjela proizvodnje akumulacijske HE	104
Slika 3.41 Energije RHE u slučaju povećanja proizvodnje IOIE	110
Slika 3.42 Energije ostalih proizvođača u slučaju povećanja proizvodnje IOIE	110
Slika 3.43 Snage pomoćnih usluga RHE u slučaju povećanja proizvodnje IOIE.....	111
Slika 3.44 Sati rada ostalih proizvođača u slučaju povećanja proizvodnje IOIE.....	111
Slika 3.45 Prihodi RHE u slučaju povećanja proizvodnje IOIE	112
Slika 3.46 Prihodi ostalih proizvođača u slučaju povećanja proizvodnje IOIE.....	112
Slika 3.47 Ukupna dobit cjelokupnog sustava u slučaju povećanja proizvodnje IOIE..	113

Popis kratica

ASM	tržište pomoćnih usluga (engl. ancillary services market)
CAES	tehnologija komprimiranog zraka (engl. compressed air energy storage)
cca.	oko (lat. circa)
CO ₂	ugljičkov dioksid
CROPEX	hrvatska burza električne energije (engl. croatian power exchange)
DAM	tržište za dan unaprijed (engl. day-ahead market)
DC	istosmjerna struja (engl. direct current)
DoD	dubina pražnjenja (engl. depth of discharge)
dr.	drugi
EES	elektroenergetski sustav
FNE	fotonaponska elektrana
GENCO	proizvodna kompanija (engl. generation company)
GW	gigavat
HE	hidroelektrana
IOIE	intermitentni obnovljivi izvori energije
itd.	i tako dalje
K	kelvin
kg	kilogram
kW	kilovat
l	litra
Li-ion	litij-ionska baterija
m	metar
m ³	metar kubični
MILP	tehnika kombiniranog cjelobrojnog linearnog programiranja (engl. mixed integer linear programming)
ms	milisekunda
MW	megavat
MWh	megavatsat
NaS	natrij-sumporna baterija
npr.	na primjer
OIE	obnovljivi izvori energije
reg-down	usluga rezerve snage za uravnoteženje EES-a prema dolje (engl. regulation down)

reg-up	usluga rezerve snage za uravnoteženje EES-a prema gore (engl. regulation up)
rel.	relativna vrijednost
RHE	reverzibilna hidroelektrana
s	sekunda
S ²⁻	anion sumpora
SMES	supravodljivi sustav za pohranu magnetske energije (engl. superconducting magnetic energy storage)
TE	termoelektrana
TE-TO	kogeneracijska termoelektrana (termotoplana)
tj.	to jest
tzv.	takozvani
VE	vjetroelektrana
VRB	vanadijumska redoks baterija (engl. vanadium redox battery)
W	vat
Wh	vatsat
η	koeficijent učinkovitosti spremišta
%	postotak
€	euro
°C	stupanj Celzijev

1. UVOD

1.1. Motivacija

Potreba za energijom postaje sve veća zbog činjenice da svjetsko stanovništvo neprestano raste, a zbog prisutnog problema globalnog zatopljenja mnoge države su se obvezale smanjiti emisije stakleničkih plinova. U potrazi za prikladnim rješenjima, svijet se okreće proizvodnji iz obnovljivih izvora energije (OIE). Energija iz vjetra i sunca postaje sve zastupljenija u elektroenergetskom sustavu (EES-u) te njen udio sve više raste [1, 2]. Prema Međunarodnoj agenciji za energiju, sustav obnovljivih izvora energije bit će najbrže rastući izvor električne energije do 2050. godine, a do 2030. će biti treći najveći proizvođač energije [3].

Budući da su brzina vjetra i količina sunčeva zračenja teško predvidljivi, energija iz vjetroelektrana (VE) i fotonaponskih elektrana (FNE) je fluktuirajućeg karaktera pa se ovi izvori često nazivaju intermitentni obnovljivi izvori energije (IOIE). Pojava veće količine takve energije u EES-u predstavlja tehnički i ekonomski izazov, ponajprije za operatora sustava, ali i za sve ostale sudionike u sustavu. Upravo se rješavanje problema varijabilnosti energije iz IOIE smatra glavnim izazovom prema uspostavi održivog, pouzdanijeg i sigurnijeg EES-a. Jedno od rješenja uspostavljanja sigurnijeg i pouzdanijeg EES-a zbog prisutnosti visokog udjela energije iz IOIE je korištenje spremišta energije [1, 4].

Spremišta energije se smatraju jednim od ključnih tehnologija za integraciju velikih količina proizvedene energije iz IOIE [5, 6]. Spremanje električne energije može učiniti EES pouzdanijim i učinkovitijim pa uloga samih spremišta u svrhu stabilizacije EES-a raste svakim danom. Sposobnost spremanja energije kad je prisutan višak energije u sustavu i naknadno korištenje te spremljene energije u slučaju nedostatka energije u sustavu predstavlja najveću korist spomenute tehnologije koja pridonosi smanjenju troškova rada sustava. Pored toga postoje mnoge druge usluge koje spremište energije čine korisnim u EES-u, kao što su: primarna, sekundarna i tercijarna regulacija frekvencije, rotirajuća i nerotirajuća rezerva, smanjivanje vršnog opterećenja odnosno izravnavanje ("peglanje") opterećenja (većih) potrošača, regulacija napona, crni start... Svaka usluga ima posebne zahtjeve na vrijeme odziva, energiju itd. te tako neke tehnologije spremišta mogu odgovoriti na određene zahtjeve u vremenskom intervalu milisekundi, dok su nekima potrebne sekunde i minute. Od nekih spremišta se traži skladištenje energije na duže vrijeme koje može biti dnevno, mjesečno, sezonsko pa čak i godišnje. Zahtjevi za spremanje energije ovise o karakteristikama promatranog EES-a (najviše o udjelu i svojstvima

pojedinih tipova elektrana), a posebno o karakteristikama intermitentne proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora u tom sustavu [1, 2, 5-14].

Pored prethodno spomenutog problema IOIE, sve veća važnost spremišta energije očituje se zbog promjena na tržištu električne energije i usluga. Tržište prolazi kroz velike promjene s obzirom na sudionike i načine trgovanja na njemu, pretvarajući monopolni sustav u konkurentni. Pojava novih tehnologija te sve većeg broja tržišnih sudionika vodi prema uspostavi konkurentnog tržišta električne energije. Liberalizacija tržišta električne energije podrazumijeva prisutnost različitih usluga na tržištu, otvoreniji pristup mreži te tržišta gdje se mogu natjecati različiti sudionici (opskrbljivači, kupci, trgovci energijom, ...). Cilj je promijeniti sustav iz monopola u oligopol, povećati dostupnost energije, razviti nove ("čistije") izvore energije, poboljšati kvalitetu usluge i smanjiti troškove sustava. Za razliku od monopolnih struktura, u restrukturiranim tržištima sudionici (naročito opskrbljivači energijom) nastoje razviti optimalne strategije rada kako bi maksimizirali profit i u što većoj mjeri smanjili rizik od gubitka profita, dok je zadaća operatora sustava brinuti se o sigurnosti i pouzdanosti cijeloga sustava. Natjecanje među tržišnim sudionicima (posebno među opskrbljivačima) zahtjeva razvitak korisnih i učinkovitih metoda za optimiziranje strategije rada, koje će im omogućiti ostvarivanje željenog cilja. Međutim, različiti utjecaji kao što su ograničenja prijenosne mreže, neočekivani ispadi generatora i prijenosnih vodova, fluktuirajuća proizvodnja IOIE te ostala ograničenja proizvođača i tržišnih sudionika čine to natjecanje još izazovnijim i konkurentnijim [1, 2]. Korištenjem spremišta energije proizvodna poduzeća mogu pružati usluge mnogo kvalitetnije te na tržištu postati znatno konkurentniji.

U posljednjem desetljeću trošak proizvodnje energije postao je mnogo nepredvidljiviji, uglavnom zbog kretanja prema konkurentnim liberaliziranim tržištima te zbog raznih globalno tragičnih događaja (svjetske bolesti, pandemije, ratovi, itd.). Ovo nestabilno ponašanje cijene električne energije može se poboljšati korištenjem tehnologije spremišta energije u svrhu iskorištavanja razlike u cijeni (energetska arbitraža). Osim toga, tehnologija skladištenja može biti i sama ekonomski isplativa, na što ukazuju trendovi kretanja cijena električne energije na *spot* tržištu, tržištu za dan unaprijed (engl. *day-ahead market* - DAM), tržištu pomoćnih usluga (engl. *ancillary services market* - ASM), regulacijskim i tržištima kapaciteta (snage), što je posebno izraženo u razdobljima energetske krize. Također, spremišta velikog skladišnog kapaciteta mogu utjecati na cijene električne energije [12-15].

Zbog svega navedenog, predviđa se porast primjene tehnologija za pohranu energije koje mogu uravnotežiti sezonsku promjenu proizvodnje i potrošnje energije. Očekuje se značajno

povećanje istraživanja i ulaganja u tehnologiju spremišta energije koja će djelovati u kombinaciji s obnovljivim izvorima energije kako bi omogućila stabilnost elektroenergetske mreže i brzo odgovorila na promjene u potražnji za energijom [3]. Sve tehnologije spremanja energije se razlikuju po svojim karakteristikama te ne postoji jedinstveno idealno rješenje. Naime, postoji više čimbenika (struktura proizvodnje u EES-a, udio proizvodnje IOIE, ...) koji utječu na izbor prikladne tehnologije spremišta u EES-u te je potrebna detaljna analiza pri samom izboru [1].

Postavlja se pitanje: koliko je potrebno spremišta energije (instalirani kapacitet) i kakve karakteristike spremišta moraju imati? Načelno je svrhovitije imati veći instalirani kapacitet, ali s porastom instaliranog kapaciteta spremišta raste i trošak izgradnje spremišta energije. Osim toga, spremišta također imaju gubitke u radu. Ovo je vrlo kompleksno pitanje na kojeg nije moguć jednoznačan odgovor, ali je moguće približno definirati optimalni kapacitet spremišta energije u ovisnosti o nizu utjecajnih parametara.

1.2. Pregled dosadašnjih istraživanja

Tehnologije spremanja su izuzetno izazovna i popularna tema zadnjih desetak godina. Razvio se niz tehnologija, svaka sa svojim karakteristikama.

U nastavku su, isprva samo ukratko, predstavljene najpoznatije tehnologije spremanja električne energije naročito one pogodne za spremanje velikih količina energije. Cilj pregleda tehnologija je dati kratki "*state of the art*" tehnologija spremanja radi daljnjeg razumijevanja ovog rada.

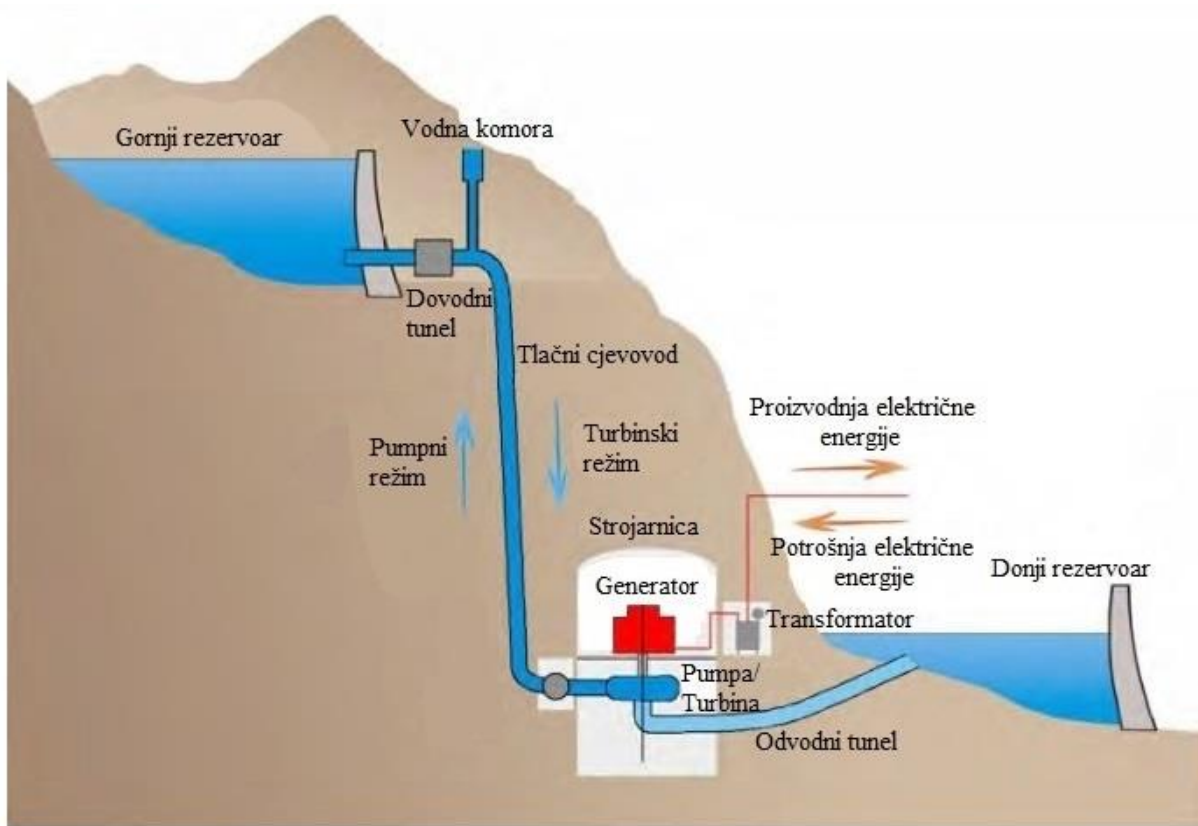
Potom su detaljno opisana znanstvena istraživanja vezana za upravljanje nabrojanim tehnologijama spremanja energije, njihovu optimizaciju rada te mogućnosti pri integraciji s drugim izvorima energije, naročito IOIE, itd.

1.2.1. Tehnologije spremanja energije

Tehnologija reverzibilne hidroelektrane

Tehnologija RHE je najveći (s obzirom na snagu) i tehnički najrazvijeniji oblik spremanja energije u cijelom svijetu koji sa 158 GW snage čini 94% svjetske instalirane snage u spremištima i preko 96% svjetske spremljene energije dostupne za mrežne potrebe [16]. Slika 1.1 prikazuje shematski prikaz RHE s njezinim osnovnim dijelovima, a to su: gornji rezervoar, dovodni tunel, vodna komora, tlačni cjevovod, strojnica, pumpa, turbina, odvodni tunel i donji rezervoar [17]. Tehnologija RHE za turbinski (proizvodni) režim iskorištava potencijalnu

energiju vode iz gornjeg rezervoara, dok u pumpnom režimu prebacuje vodu iz donjeg u gornji rezervoar koristeći električnu energiju iz mreže [18].



Slika 1.1 Shema RHE

Postoje različite podjele RHE pa s obzirom na dotoke u gornji i donji rezervoar razlikuju se:

- RHE s dotocima u gornji i donji rezervoar (engl. *open loop system*)
- RHE s dotokom u gornji ili donji rezervoar (engl. *semi-open loop system*)
- RHE bez dotoka u oba rezervoara (engl. *closed loop system*) [13].

Prema instaliranoj snazi, RHE se dijele na:

- piko (za snage manje od 5 kW)
- mikro (za snage 5-10 kW)
- male (za snage 0,01-10 MW)
- velike (za snage veće od 10 MW) [19].

S obzirom na rad u pumpnom režimu razlikuju se:

- strojevi s fiksnom brzinom pumpanja

- strojevi s promjenjivom brzinom pumpanja
- strojevi koji mogu raditi u hidrauličnom kratkom spoju (engl. *hydraulic short circuit - HSC*).

RHE imaju očekivani životni vijek 50-100 godina, koeficijent učinkovitosti (engl. *round-trip efficiency*) 75-85% te brz odziv na promjene (u rangu sekunda i minuta) [18, 20]. Vrijeme pokretanja RHE je kratko (1-2 minute), a vrijeme potrebno za prelazak iz turbinskog u pumpni režim je reda veličine 5 minuta pa se zbog toga koristi u proizvodnji energije za vrijeme vršnih opterećenja, regulaciji frekvencije, rotirajućoj i nerotirajućoj rezervi te u regulaciji napona [21]. Budući da se mogu pokrenuti samostalno (neovisno o mreži) to ih čini idealnim kandidatom za crni start, a zbog svog niskog koeficijenta samopražnjenja pogodne su za spremanje velike količine energije na duže vrijeme [6]. Nedostatak im je u tome što zahtijevaju posebno mjesto za izgradnju (izgradnja im ovisi o karakteristikama terena) te je potrebno dugo vremena za izgradnju [13, 14, 18, 20-22]. Pravilno korištenje RHE u EES-u može dovesti do smanjenja troškova rada sustava, a zbog svog velikog kapaciteta spremanja može utjecati na cijene električne energije, omogućiti bolju integraciju IOIE u EES te na taj način smanjiti emisije stakleničkih plinova [13, 14]. Tehnologije RHE se i dalje razvijaju potaknuti zahtjevima IOIE i tržišta.

Baterije

Brojna istraživanja pokazuju razne tipove baterija kao korisna, pouzdana i prikladna rješenja za pohranu energije. Zbog velike raznovrsnosti i širokog spektra različitih materijala koji se koriste u industriji proizvodnje baterija postoji opasnost od ispuštanja značajnih količina štetnih tvari (npr. opasni otpad, emisije stakleničkih i otrovnih plinova) tijekom procesa kao što su rudarenje, proizvodnja, uporaba, transport, sakupljanje, skladištenje, odlaganje i recikliranje. Uskoro se očekuje uporaba baterija u širokom opsegu te se smatra da će to imati značajne društvene i okolišne učinke. Baterije su većinom izrađene od elektroda uronjenih u kemikaliju u kojoj se kemijska energija pretvara u električnu i obrnuto. Baterije su u posljednje vrijeme doživjele nagli razvoj i primjenu u različitim prijenosnim elektroničkim uređajima, električnim automobilima, itd. Neke od baterija pogodne za korištenje u svrhu EES-a su:

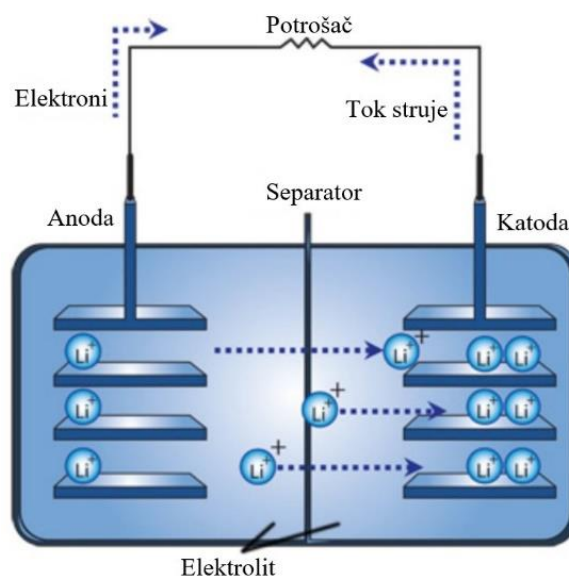
- Litij-ionska (Li-ion) baterija
- Natrij-sumporna (NaS) baterija

- Olovna baterija
- Protočna baterija [23, 24].

Također, razlikuju se i po svojim značajkama među kojima se izdvajaju:

- snaga
- kapacitet
- učinkovitost
- životni vijek (najčešće dan kao broj ciklusa pokretanja/zaustavljanja)
- radna temperatura
- dubina pražnjenja (engl. *depth of discharge* - DoD)
- koeficijent samopražnjenja.

Litij-ionske (Li-ion) baterije široko se koriste u mobilnim uređajima i prijenosnim elektroničkim uređajima. Ova vrsta baterije privlači veliko zanimanje s obzirom na materijale od kojih se proizvodi, kako bi se omogućila njihova primjena u sustavima velikih snaga, poput električnih automobila i skladišta energije. Rad Li-ion baterije temelji se na elektrokemijskim reakcijama između pozitivnih litijevih iona s analitičkim i katalitičkim aktivnim materijalima. Elektrode (katoda i anoda) su uronjene u elektrolitnu tekućinu u kojoj se nalazi separator, koji omogućuje prolaz litijevih iona. Katoda se obično sastoji od litijevog metalnog oksida, dok je anoda grafit, a elektrolit je tekućina koja sadrži otopljene litijeve soli. U ciklusu punjenja pozitivni ioni litija idu prema anodi, dok je proces pražnjenja obrnut (slika 1.2) [25].



Slika 1.2 Princip rada Li-ion baterije (pražnjenje)

Li-ion baterije imaju visok koeficijent učinkovitosti, veliku gustoću energije i specifičnu energiju, nisku stopu samopražnjenja te jednostavno održavanje. Brzo se pune i prazne. Očekivani broj ciklusa punjenje/praznjenje je 1000-4000, što uvelike ovisi o dubini pražnjenja. Vrijeme potrebno za dostizanje 90% nazivne snage baterije je približno 200 ms s vrlo visokim stupnjem korisnosti. Prikladne su za primjenu gdje su važni vrijeme odziva i težina. Nedostatak im je visoki trošak ulaganja te nisu primjerene za uporabu u sigurnosnim radnjama gdje se mogu isprazniti do kraja jer im vijek trajanja ovisi o već spomenutoj dubini pražnjenja [26-35]. Kao važne značajke Li-ion baterija ističe se:

- velika gustoća energije (170-300 Wh/l)
- velika specifična energija (80-150 Wh/kg)
- niska stopa samopražnjenja
- jednostavno održavanje.

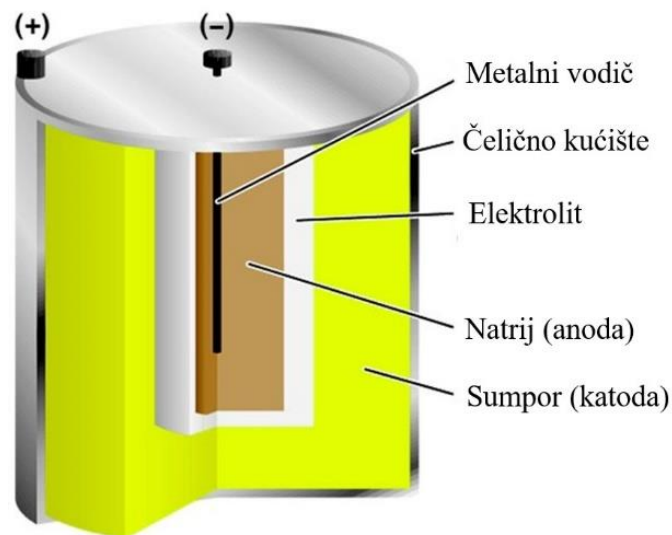
Zbog krhkosti ovih baterija, vrlo je važno održavati napon i temperaturu u zadanom opsegu [26, 27]. Svoju ulogu su pronašle u brojnim primjenama od kojih se najviše ističu elektronika i automobilska industrija. Međutim, pored te dvije primjene važno je spomenuti i primjenu u industriji, odnosno kao spremište energije. Primjena spremišta energije može se podijeliti u nekoliko kategorija:

- u svrhu stabilizacije mreže, odnosno regulaciju energije iz IOIE
- u svrhu regulacije energije za potrebe EES
- u svrhu neprekidnog napajanja za hitne slučajeve
- u svrhu spremanja energije iz IOIE
- primjena u privatnim domaćinstvima i dr.

Iako su brojne primjene Li-ion baterija još u fazi istraživanja, razvoju tehnologije se pridaje velika pozornost zbog trenutnih energetskeg problema i zagađenja okoliša. Raspon snage Li-ion baterija kao spremišta kreće se od malih (za kućnu uporabu) do onih koji se koriste u regulaciji proizvedene energije iz velikih IOIE [28].

U natrij sumpornoj (engl. *sodium sulfur* - NaS) bateriji anoda je napravljena od natrija, dok je katoda od sumpora. Aluminijev oksid predstavlja i elektrolit i separator. Tijekom pražnjenja, Na⁺ ioni s anode putuju prema katodi, dok katoda ispušta S²⁻ anione. Elektrolit omogućava prijenos natrijevih iona do katode gdje se oni kombiniraju sa sumporovim anionima

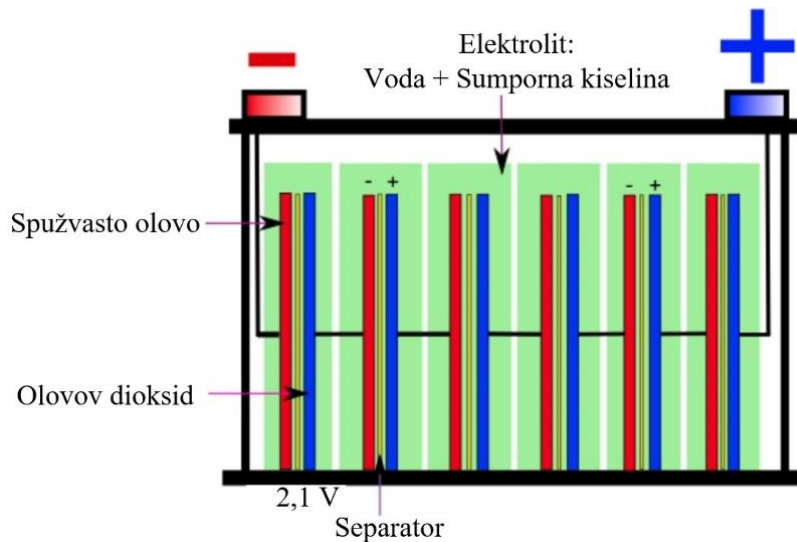
stvarajući natrijeve polisulfide. Tijekom punjenja događa se obrnuti proces. NaS baterije se obično izvedu u cjevastom obliku gdje se natrij nalazi u unutarnjoj šupljini koju sačinjava elektrolit (slika 1.3) [36]. Budući da su u NaS baterijama elektrode u tekućem obliku, jedna od važnijih karakteristika ovog tipa baterija je visoka radna temperatura (oko 350°C). Na ovoj temperaturi su natrij, sumpor i natrijev polisulfid u tekućem stanju što omogućava visoku reaktivnost elektroda. Gustoća energije i stupanj korisnosti ovih baterija su visoki (151 W/l i 85%). Također, važna odlika ovih baterija je da nemaju samopražnjenja, lako im je održavanje, a mogućnost reciklaže im je 99%. Životni vijek im je otprilike 15 godina i mogu napraviti više od 4000 ciklusa punjenje/pražnjenje. Mogu se koristiti za velike snage (nekoliko MW) te sudjelovati u opskrbi mreže 6-7 sati što ih čini pogodnima kao spremišta energije u EES-u, primarnoj i sekundarnoj regulaciji [26, 27].



Slika 1.3 NaS baterija

Olovne baterije se smatraju najrazvijenijim tipom baterija. Sastavljena je od ćelija uronjenih u razrijeđenu sumpornu kiselinu koja služi kao elektrolit (slika 1.4) [37]. Pozitivna elektroda svake ćelije sastoji se od olovnog dioksida, dok je negativna elektroda od spužvastog olova. Tijekom pražnjenja obje se elektrode pretvaraju u olovni sulfat, dok se tijekom punjenja obje elektrode vraćaju u njihovo početno stanje. Koeficijent učinkovitosti im je 75-80 %, a vijek trajanja 5-15 godina te ovisi o dubini pražnjenja i o radnoj temperaturi baterije. Zbog niskog koeficijenta samopražnjenja, olovne baterije su pogodne za spremanje energije na duže vrijeme. Imaju niske početne troškove i visoku pouzdanost. Osim relativno loših karakteristika baterije pri niskim i visokim temperaturama okoline te kratkom životnom vijeku, glavni nedostaci

olovne baterije su visok trošak održavanja, te niska specifična snaga i energija (180 W/kg i 30 Wh/kg). Olovne baterije se najviše koriste u automobilima te u industriji. Glavna uporaba u industriji im je primjena za stanje pripravnosti, odnosno služe kao sigurnosno napajanje gdje je bitan kontinuitet opskrbe električnom energijom te se u nekim slučajevima upotrebljavaju i u pohrani energije [26, 27, 38].



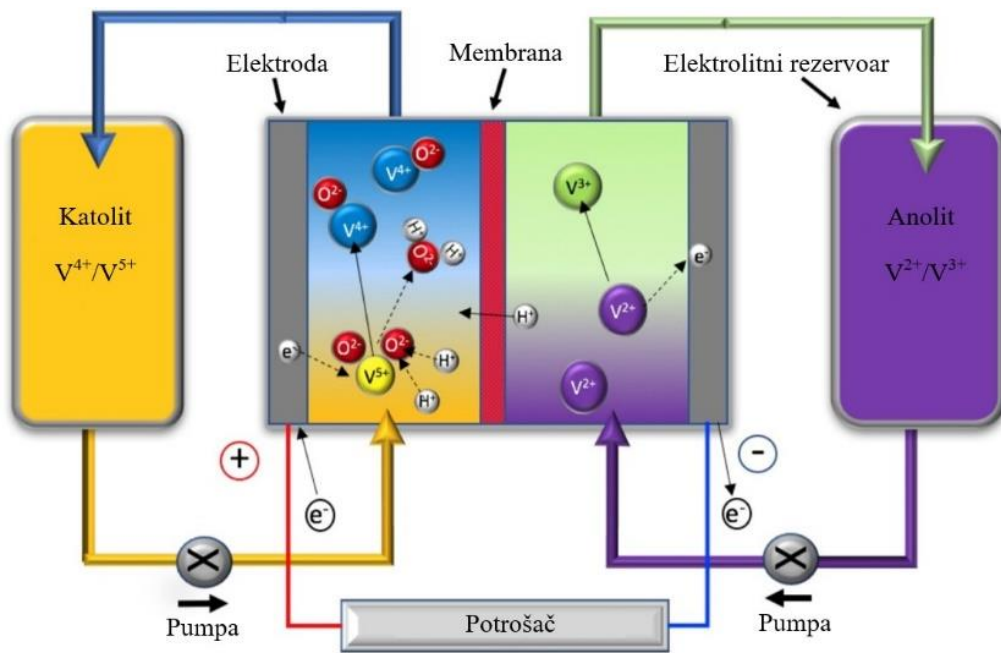
Slika 1.4 Olovna baterija

Rad protočnih baterija temelji se na reverzibilnim elektrokemijskim reakcijama koje se javljaju u ćelijama povezanim u seriju, paralelu ili kombinirano, ovisno o naponu koji se želi dobiti. U ovih se baterija dvije različite elektrolitske otopine nalaze u odvojenim rezervoarima (slika 1.5) [39]. Tijekom rada baterije, vodene otopine se pumpaju kroz elektrokemijsku ćeliju u kojoj se odvijaju reakcije. Najčešća tri tipa protočnih baterija su:

- vanadijumska redoks baterija (engl. *vanadium redox battery* - VRB)
- cink bromska baterija
- polisulfid bromidna baterija.

Budući da se njihov rad temelji na redukciji i oksidaciji elektrolita, ovi tipovi baterija još se nazivaju redukcijско-oksidijske (redoks) protočne baterije. Tijekom procesa punjenja, jedan elektrolit se oksidira na anodi, dok se drugi elektrolit reducira na katodi. Proces pražnjenja se sastoji od obrnutog postupka. Jedna od glavnih prednosti protočnih baterija je da je njihov kapacitet energije lako podesiv, jer ovisi o količini pohranjenog elektrolita. Zbog toga su snaga i energija kod protočnih baterija nezavisne karakteristike. Snaga baterija ovisi o broju ćelija i

veličini elektroda. Protočne baterije postižu učinkovitost od 78%. One se mogu u potpunosti isprazniti bez ikakvih oštećenja te imaju vrlo nizak stupanj samopražnjenja jer se elektroliti skladište u posebnim, zatvorenim tankovima. Protočne baterije imaju dug životni vijek (15-20 godina s više od 10000 ciklusa punjenje/pražnjenje pri 100% DoD) te su sposobne skladištiti energiju tijekom dužih razdoblja. Troškovi rada kod protočnih baterija nisu zanemarivi zbog kontrole elektrolitičkog protoka i pumpi. Najpoznatiji tip protočnih baterija je vanadij redoks. Nedostatci su im niska specifična energija i gustoća energije (25-35 Wh/kg i 20-33 Wh/l). Koriste se u svrhu smanjenja vršnog opterećenja, u regulaciji frekvencije te kao spremište energije za potrebe EES-a [26, 27].



Slika 1.5 Princip rada redoks protočne baterije

Supravodljivi sustav za pohranu magnetske energije

Supravodljivi sustav za pohranu magnetske energije (engl. *superconducting magnetic energy storage* - SMES), superzavojnica, koristi istosmjernu struju koja stvara magnetsko polje kroz supravodljivu zavojnicu pri niskoj temperaturi. Slika 1.6 prikazuje izgled SMES sustava [40]. Osnovni dijelovi SMES sustava su:

- supravodljiva zavojnica
- sustav za pretvorbu energije
- hladnjak.

Karakteristike SMES sustava najviše ovise o karakteristikama same zavojnice. Ovisno o temperaturi na kojoj sustav radi supravodljiva zavojnica može biti:

- visokotemperaturna zavojnica (radi na oko 70 K)
- niskotemperaturna zavojnica (radi na oko 5 K).

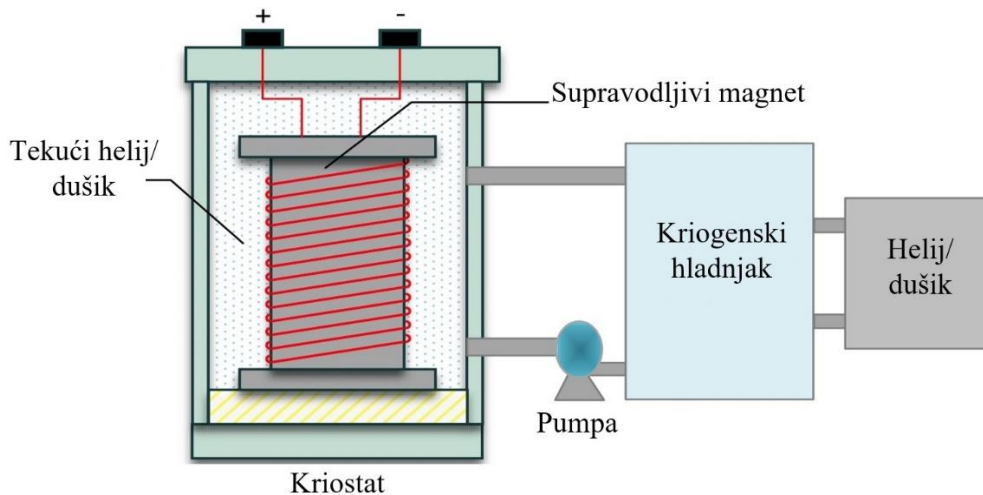
Maksimalna struja koja može teći kroz supravodljivu zavojnicu ovisi o temperaturi, odnosno što je temperatura na kojoj sustav radi manja, veća struja može teći sustavom. Karakteristike SMES sustava su:

- vrlo nizak koeficijent samopražnjenja jer ne postoji otpor struji koja protječe (zbog niske temperature)
- velika specifična snaga
- mala gustoća energije
- visoka učinkovitost sustava (oko 95%)
- sposobnost injektiranja ili apsorpcije velike količine energije u kratkom vremenu
- dug životni vijek
- visoki investicijski troškovi.

Zbog svojih karakteristika SMES se koristi u slučajevima kao što su:

- potreba za kvalitetom električne energije
- kao neprekinuti izvor napajanja
- u stabilizaciji mreže
- u regulaciji proizvodnje i potrošnje na lokalnoj razini.

Međutim, zbog velikih investicijskih troškova te nemogućnosti opskrbe sustava energijom na duže vrijeme, SMES još uvijek nije našao širu uporabu u EES-u [26, 27, 41].



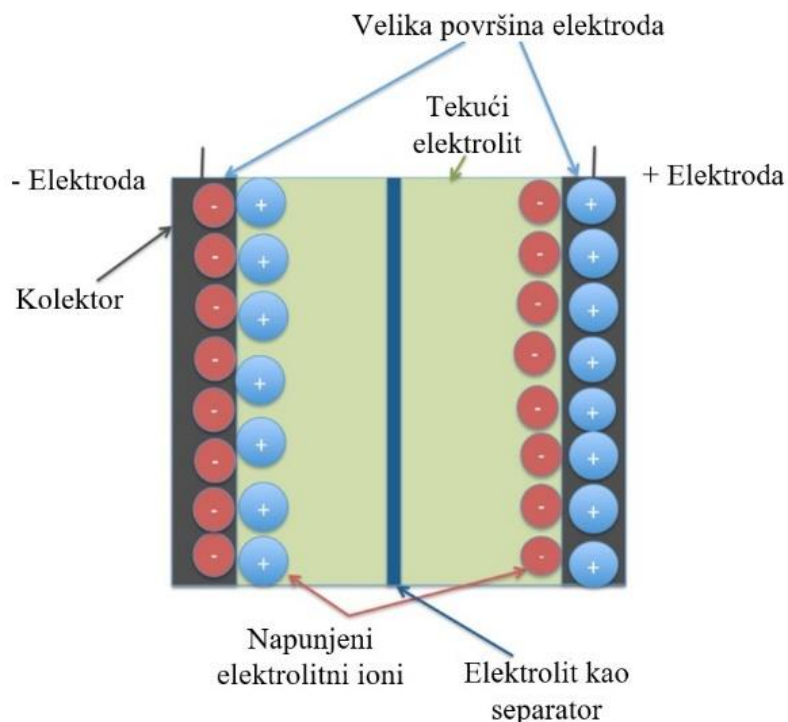
Slika 1.6 SMES tehnologija

Superkondenzatori

Superkondenzatori se još nazivaju i ultrakondenzatori te svoj rad temelje na elektrokemijskim ćelijama koje sadrže dvije vodljive elektrode, elektrolit i membranu kao separator, pri čemu ioni prolaze kroz njega između dviju elektroda. Za razliku od baterija, u ćelijama superkondenzatora se ne odvijaju reakcije oksidacije i redukcije. Zapravo, ovu strukturu čine dva kondenzatora (elektrolit-negativna elektroda, elektrolit-pozitivna elektroda) te se zbog toga još nazivaju dvoslojni kondenzatori (slika 1.7) [42]. Spremljena energija u kondenzatorima je proporcionalna njihovom kapacitetu i kvadratu napona među stezaljkama ćelija, dok je kapacitet proporcionalan površini elektroda i obrnuto proporcionalan udaljenosti među njima. Glavna razlika između kondenzatora i superkondenzatora je korištenje poroznih elektroda s velikom površinom samih elektroda, omogućavajući pri tome veću gustoću energije od kondenzatora. Zbog malog napona koji vlada među ćelijama, željeni izlazni napon dobije se serijskim ili paralelnim spajanjem setova ćelija. Naime, najveći utjecaj na snagu, energiju i dinamičke promjene superkondenzatora ima materijal od kojeg su napravljene elektrode i elektrolit. Karakteristike superkondenzatora su:

- velika specifična snaga i gustoća snage (~2000-5000 W/kg, ~20000-30000 W/l)
- mala specifična energija i gustoća energije (~2-5 Wh/kg, 10 Wh/l)
- niski troškovi održavanja
- visoki investicijski troškovi.

Zbog malog otpora između elektroda i elektrolita, koeficijent samopražnjenja može doseći čak 20% nazivne snage za 12 sati pa zbog toga ovakav sustav ne može spremi energiju na duže vremena. Budući da im životni vijek prelazi preko milijun ciklusa punjenje/pražnjenje, superkondenzatori mogu bez narušavanja kvalitete isporučene energije sudjelovati u kratkotrajnim opskrbama energijom uslijed pada proizvodnje fluktuirajuće energije (iz IOIE), u svrhu smanjenja vršnog opterećenja, itd. Činjenica da im potrebno vrijeme za punjenje i pražnjenje do nazivne snage ne prelazi 30 s, čini ih najboljom tehnologijom za korištenje u sustavima gdje je potrebna velika snaga u kratkom vremenu. Zbog toga su pogodni za regulaciju frekvencije te zamjena za rotirajuću rezervu. S obzirom na druge tehnologije, superkondenzatori svoje namjene obavljaju u kratkom vremenu na vrlo ekonomičan način jer je njihova učinkovitost blizu 98%. Superkondenzatori mogu biti pouzdano rješenje u regulaciji napona te za pružanje stabilnosti u mikromrežama. Unatoč svim svojim dobrim karakteristikama superkondenzatori se zbog niske gustoće energije, velikog koeficijenta samopražnjenja te visokog investicijskog troška ne koriste u većoj mjeri za potrebe spremišta energije u EES-u, već imaju pomoćnu ulogu [26, 27, 43-47].



Slika 1.7 Superkondenzator

Tehnologija zamašnjaka

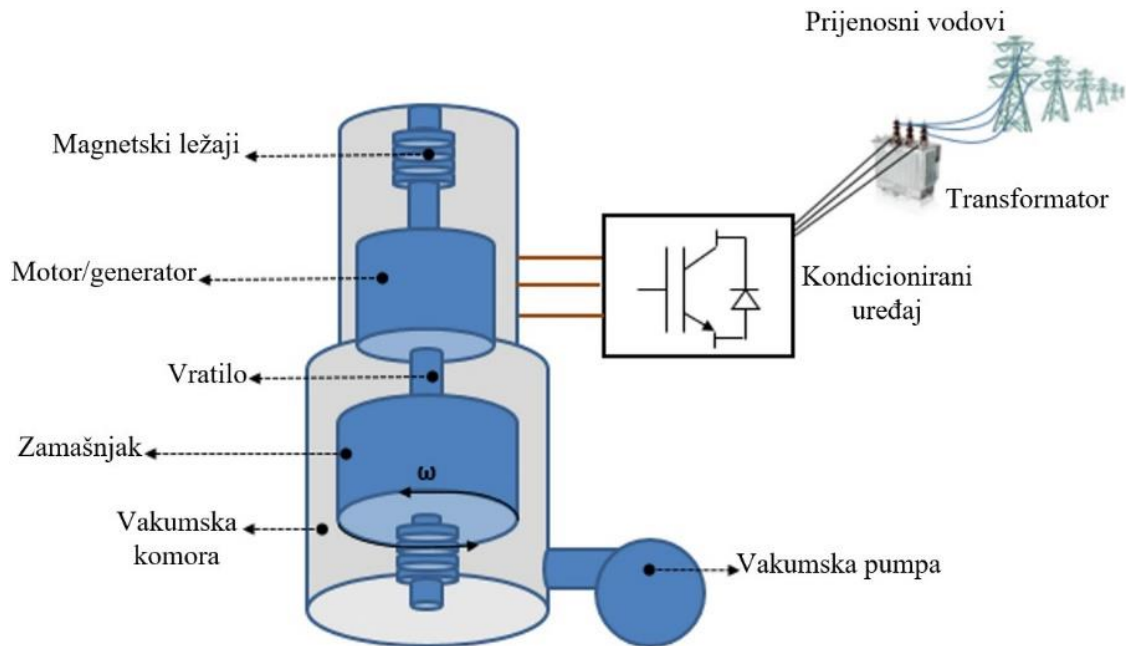
Tehnologija zamašnjaka je elektromehanički sustav koji svoju energiju pohranjuje u obliku kinetičke energije. Zamašnjak je spojen na motor/generator te rotira na mehaničkim ili magnetskim ležajima (kod magnetskih ležaja je manje trenje). Cjelokupni sustav (zamašnjak, ležaji, motor/generator) se najčešće nalazi u vakuumskoj komori zbog smanjenja trenja i gubitaka energije. Energija se sprema u zamašnjak na način da se pokrene motor koji ubrzava okretanje zamašnjaka, dok se energija iz zamašnjaka koristi na način da rotirajući zamašnjak pokreće generator koji tada usporava okretanje zamašnjaka (slika 1.8) [48]. Podjele zamašnjaka mogu biti različite, a to su:

- po izvedbi stroja motor/generator
- po brzini okretanja zamašnjaka
- po materijalu od kojeg se sastoji zamašnjak.

Glavne karakteristike cjelokupnom sustavu daje materijal korišten za komponente sustava. Karakteristike sustava su:

- dobra učinkovitost (oko 90%)
- fleksibilna dubina pražnjenja
- visoka gustoća snage i energije
- niski troškovi održavanja
- malo vrijeme odziva (otprilike 1 ms)
- dug životni vijek.

Važna značajka zamašnjaka je značajna snaga koju može pružiti u kratkom vremenu pa je pogodan za korištenje u regulacijama (regulacija frekvencije), u primjenama gdje je potrebna kvaliteta električne energije (smanjenje propada snage i kratkih beznaponskih stanja). Glavni nedostaci zamašnjaka kao spremišta energija su visoki gubici samopražnjenja (20% nazivne snage po satu) te nemogućnost dugoročne opskrbe što ga sprječava za korištenje kao dugotrajno spremište energije [26, 27].



Slika 1.8 Shematski prikaz zamašnjaka

Tehnologija komprimiranog zraka

Tehnologija komprimiranog zraka (engl. *compressed air energy storage* - CAES) temelji se na dobro poznatoj tehnologiji plinskih turbina. U ovom sustavu energija se sprema u obliku komprimiranog (stlačenog) zraka u spremnicima (podzemni prostori ili posebni spremnici prilagođeni za to). U slučaju potrebe za proizvodnjom energije, stlačen zrak se izvlači iz podzemnih spremnika, zagrijava se i ekspanrira u visokotlačnoj i niskotlačnoj plinskoj turbini koja pretvara energiju stlačenog zraka u mehaničku (rotacijsku) energiju. Zrak se dodatno miješa s prirodnim plinom radi pregrijavanja te onda sagorijeva i ekspanrira u turbinama. Otpadna toplina koja nastaje u turbini odvodi se u grijač koji se koristi za zagrijavanje zraka iz podzemnog spremišta (slika 1.9) [27].

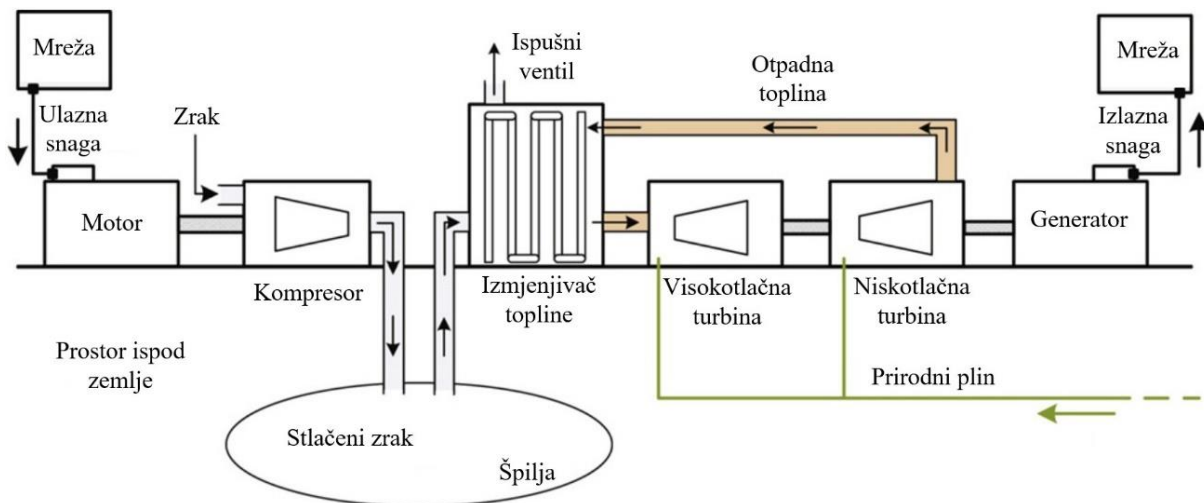
S obzirom na prostor gdje se skladišti zrak, postoje različite vrste spremišta:

- špilje posebno izrađene za spremište zraka
- postojeće špilje stvorene za proizvodnju soli i pretvorene u spremišta
- rudarske špilje
- preuređeni rudnici
- kamenolomi, zatvorene podzemne površine.

Prikladno mjesto za ovakvo spremište se odabire uzimajući u obzir različite geološke karakteristike poput:

- dubine (između 200 m i 1000 m)
- debljine stijenke špilje
- stabilnosti špilje u uvjetima promjene tlaka
- prisutnosti minerala i opasnosti od oksidacije.

Upravo se trošak spremišta smatra glavnim čimbenikom koji ograničava razvoj CAES tehnologije. Ako već postoji prirodno spremište onda CAES tehnologija može biti isplativa, međutim ako ga je potrebno izgraditi, troškovi postaju preveliki. Da bi bili ekonomski isplativi CAES postrojenja se grade s 500-2500 MWh energije i 50-300 MW snage. Životni vijek ovakvog sustava je oko 40 godina te ima stupanj korisnosti oko 70%. Budući da je koeficijent samopražnjenja vrlo nizak, ovakvi sustavi se smatraju prikladnim spremištima za dugoročnu pohranu energije. Većina CAES postrojenja su manja od tipičnih postrojenja RHE, ali su mjesta pogodna za njihovu izgradnju rasprostranjenija od onih za RHE. Također, CAES tehnologija je jedina tehnologija nakon RHE koja može skladištiti veliku količinu energije pa je zato pogodna za uravnoteženje energije iz IOIE, kao i za mnoge druge usluge u EES-u [26, 27, 49].



Slika 1.9 Shema CAES postrojenja

1.2.2. Istraživanja optimizacije rada spremišta u elektroenergetskom sustavu

Tehnologija reverzibilne hidroelektrane

Brojni autori su istraživali optimalan rad RHE na različitim tržištima električne energije s ciljem maksimiziranja zarade, uzimajući u obzir različite izvedbe hidrauličnih i električnih strojeva s IOIE i bez njih [9, 50-94].

S obzirom da postoje različita tržišta na kojima spremišta energije mogu sudjelovati (tržište energije, tržište snage, tržište pomoćnih usluga...) s ciljem ostvarivanja što veće zarade, brojni autori su razvijali optimalne strategije rada RHE koje će im omogućiti maksimizaciju profita [50-61]. Autori u [50] razvijaju algoritam koji daje optimalnu strategiju rada RHE na DAM tržištu i tržištu pomoćnih usluga na osnovu satnih cijena. Algoritam je testiran na RHE te je pokazana korisnost algoritma u pronalaženju dnevnog i tjednog optimalnog rada RHE. U [50] se promatrao sustav samo sa RHE i mrežom, a u [51] su se u obzir uzeli i potrošači. Pored maksimizacije prihoda od prodaje energije u mrežu, cilj je još bio i minimizirati preuzetu energiju iz mreže. Pokazalo se da korištenje RHE može smanjiti trošak preuzet iz mreže te da promatrani sustav može i zaraditi kad radi energetska arbitražu. Autori u [52] i [53] su slično kao u [51] promatrali utjecaj RHE na DAM tržištu, ali su modeli u [52] i [53] riješeni drugačijim metodama (dinamičko programiranje). Pokazali su da je ostvarena veća financijska dobit kad se RHE uzela u obzir u postojeći hidrološki sustav [52] te da RHE može smanjiti rizik u fluktuaciji cijena [53]. Pored toga što su autori istraživali rad RHE kao samostalnih proizvodnih jedinica, u [54, 55] istraživan je kaskadni sustav hidroelektrana (HE) zajedno s RHE. Ustanovljeno je da je godišnja dobit istog kaskadnog sustava akumulacijskih HE s i bez mogućnosti reverzibilnog rada na DAM tržištu veća u slučaju mogućnosti reverzibilnog rada [54] te je razvijen model koji maksimizira dobit kaskadnog sustava HE i RHE na tržištu za dan unaprijed i tržištu pomoćnih usluga, a uzimajući u obzir troškove pokretanja te rada i održavanja [55].

Budući da postoje različite izvedbe RHE sa stajališta hidrauličnih i električnih pogonskih strojeva (pumpa-turbina, motor-generator), autori su u [62-74] istraživali prednosti i nedostatke u radu različitih izvedbi RHE, koncentrirajući se na njihovo sudjelovanje na različitim tržištima električne energije. U [62-65] istražene su optimalne strategije rada RHE s obzirom na fiksnu i promjenjivu brzinu pumpanja. Autori su zaključili da je u gotovo svim slučajevima prihod od tržišta pomoćnih usluga veći od prihoda na DAM tržištu [62] te da je tržište sekundarne regulacije glavni izvor zarade [62, 63]. Isti autori su u [64] proširili istraživanje iz [63] tako što su istraživali RHE na istim tržištima. Razlika u odnosu na [63] je u tome što je u [64] uzeta u obzir nesigurnost u predviđanju cijena na promatranim tržištima. Ustvrdili su da je razlika u

prihodu između pumpe s fiksnom brzinom i pumpe s promjenjivom brzinom 12,2% u korist promjenjive brzine kada sudjeluju samo na tržištu za dan unaprijed te čak 163% ako sudjeluju na oba tržišta. Također u [65], najveći profit se pojavio kada RHE sudjeluje na oba tržišta i to s promjenjivom brzinom vrtnje, jer u tom slučaju može i u pumpnom režimu sudjelovati na tržištu sekundarne regulacije. Isti autori koji su u [63, 64] istraživali razliku između RHE s fiksnom i promjenjivom brzinom pumpe na tržištu, u [66] su pored fiksne brzine u obzir uzeli i rad u hidrauličnom kratkom spoju (istovremeni rad pumpe i turbine). Razvili su model koji maksimizira prihod RHE koja sudjeluje na tržištu za dan unaprijed i tržištu sekundarne regulacije. Naime, glavna prednost rada u hidrauličnom kratkom spoju je da RHE tada može regulirati snagu u pumpnom režimu i na taj način sudjelovati na tržištu regulacije energije. RHE se u tom slučaju može smatrati upravljivim potrošačem, doprinoseći na taj način boljoj integraciji IOIE za razliku od RHE s fiksnom brzinom pumpanja. Pokazalo se da sve izvedbe RHE zarađuju većinom na tržištu sekundarne regulacije zbog toga što su na tom tržištu cijene veće od cijena na tržištu za dan unaprijed. Također, RHE koja radi u hidrauličnom kratkom spoju može povećati svoju dobit za 162,3% u usporedbi s onom koja ne radi u hidrauličnom kratkom spoju, odnosno što je RHE fleksibilnija u radu, prihod sa tržišta sekundarne regulacije je veći te je stoga i ukupni prihod veći. Također, u [67-70] istražen je rad RHE u hidrauličnom kratkom spoju na tržištu za dan unaprijed i tržištu pomoćnih usluga. U [67] se s obzirom na rad u hidrauličnom kratkom spoju dobilo vrijeme povrata ulaganja u odnosu na investicijske troškove. Pokazalo se da je vrijeme povrata ulaganja, bez obzira na rad u hidrauličnom kratkom spoju (s i bez njega) značajno manje od očekivanog životnog vijeka RHE te da se vrijeme povrata može dodatno smanjiti uključivanjem hidrauličnog kratkog spoja. Također, ekonomska održivost nije ugrožena ako postrojenja sudjeluju na tržištu sekundarne regulacije bez obzira rade li ili ne rade s promjenjivom brzinom ili u hidrauličnom kratkom spoju te se vrijeme povrata ulaganja može smanjiti ako RHE radi s promjenjivom brzinom i/ili u hidrauličnom kratkom spoju, odnosno takva postrojenja će imati najkraće vrijeme povrata [69]. U [70] uspoređen je prihod RHE koja radi s fiksnom brzinom pumpanja i u hidrauličnom kratkom spoju na tržištu energije za dan unaprijed i tržištu sekundarne regulacije, uzimajući u obzir prihod zarađen na promatranim tržištima i troškove pumpanja te pokretanja postrojenja. Autori su zaključili da bez obzira radi li RHE s fiksnom brzinom ili u hidrauličnom kratkom spoju, ona ostvaruje profit, ali da se zbog svoje fleksibilnosti u radu značajno veći profit ostvaruje u slučaju rada u hidrauličnom kratkom spoju.

U većini EES-a termoelektre (TE) pokrivaju glavni dio opterećenja i teško se prilagođavaju promjenama u zahtjevu energije, a zbog svoje tromosti nisu pogodne u pokrivanju vršnih opterećenja. Budući da RHE imaju brz odziv na promjene, upravo su one jedna od pogodnijih tehnologija za regulaciju sustava i pokrivanje vršnih opterećenja [95]. U [95-97] opisan je rad RHE u sustavu s TE u kojima je cilj RHE smanjiti trošak sustava. Ustanovilo se da korištenje RHE doprinosi manjem trošku goriva, odnosno uštedama goriva u takvom sustavu.

Ključni problem kod IOIE je kontrola promjenjivosti njihove proizvodnje. U sustavima u kojima su prisutne akumulacijske HE i RHE, one preuzimaju veliki dio u regulaciji energije zbog svoje tehnološke sposobnosti i brzine te zbog povoljnih ekoloških utjecaja na okoliš. Naime, ta postrojenja postaju sve značajnija u smislu regulacije energije u hibridnim sustavima (sustavi spremišta energije i IOIE). Istraživanja su pokazala da zajednički rad hidroelektrana (posebno RHE) i IOIE postaje sve učestaliji zbog dobrih karakteristika takvih sustava. S obzirom na tržište električne energije, HE imaju ključnu ulogu u pomoćnim uslugama pa doprinos pomoćnih usluga u integraciji IOIE postaje važna tema [75]. Budući da su se RHE s promjenjivom brzinom vrtnje u pumpnom režimu pokazale efikasnije od RHE s fiksnom brzinom s gledišta pomoćnih usluga, autori su u [75, 76] prikazali rad RHE s fiksnom brzinom vrtnje i s promjenjivom brzinom vrtnje uz vjetar kao IOIE. Zarada RHE s fiksnom brzinom vrtnje u pumpnom režimu, promjenjivom brzinom vrtnje te s trodijelnom izvedbom koja radi u hidrauličnom kratkom spoju na tržištu za dan unaprijed i tržištu sekundarne regulacije, s i bez prisutnosti energije vjetra uspoređena je u [76]. Studija je rađena u ljeto i zimu zbog razlika u opterećenju sustava i razini energije iz vjetra. Rezultati ukazuju da bez obzira na postojanje energije iz vjetra, RHE s promjenjivom brzinom i RHE s trodijelnom izvedbom imaju veći prihod od RHE s fiksnom brzinom te da te dvije izvedbe više sudjeluju na oba tržišta za razliku od RHE s fiksnom brzinom. Također, rad u hidrauličnom kratkom spoju nudi više prednosti nego izvedba s promjenjivom brzinom. Dnevni rad RHE koja sudjeluje u pokrivanju vršnih opterećenja sustava koji se sastoji od TE, VE i RHE s ciljem minimizacije troškova rada TE (troškovi goriva, pokretanja) prikazan je u [9]. Korištenje RHE u svrhu spremanja energije pokazalo se učinkovitim zbog toga što RHE kompenzira proizvodnju iz TE za vrijeme vršnog opterećenja pa na taj način smanjuje troškove rada cijelog sustava. Minimizacija troškova rada sustava koji se sastoji od TE, VE i RHE izvedena je u [77]. Posebno se ispitalo uključanje RHE u otočni sustav koji ima dostupnu znatnu količinu energije iz vjetra. Ustvrdilo se da uključanje RHE u promatrani sustav može biti korisno jer omogućuje veću iskoristivost i

apsorpciju energije iz vjetra, poboljšavajući dinamičku sigurnost i ekonomičnost rada cijelog sustava.

Uz prethodno spomenutu literaturu u kojima su autori minimizirali troškove promatranog sustava gdje je jedan od izvora energije bio vjetar, autori su u [78-87] istraživali utjecaj RHE također s vjetrom kao IOIE, ali sa stajališta maksimizacije profita promatranog sustava uzimajući u obzir pogreške u prognozi vjetra (što rezultira pogreškom u pretpostavljenoj proizvodnji energije iz vjetra). U [78] optimizirana je dnevna strategija rada hibridnog postrojenja koji se sastoji od VE i RHE u vlasništvu neovisnog proizvođača energije koji sudjeluje na tržištu za dan unaprijed. U obzir su se uzeli troškovi rada RHE u pumpnom i turbinskom režimu, troškovi zbog neiskorištene energije iz vjetra te penali zbog proizvodnje ispod minimalno zadane granice proizvodnje. Rezultati pokazuju da je u periodima niskih cijena na tržištu za dan unaprijed prodana energija vrlo mala u usporedbi s periodima kad su cijene visoke. Također, tijekom perioda niskih cijena, veći dio energije iz VE se koristio za pumpanje vode u gornji rezervoar da bi se kasnije ta pumpana energija mogla iskoristiti u periodima visokih cijena. Sličan problem autori su istraživali u [79], odnosno ispitivali su može li RHE doprinijeti boljem iskorištavanju energije iz vjetra. Uzimao se u obzir profit od proizvedene energije iz VE i RHE te gubitak profita zbog pumpane energije i troškova (penala) nastalih zbog proizvodnje energije ispod minimalno dogovorene granice. U periodima kada je dostupna velika količina energije vjetra, voda se pumpa iz donjeg u gornji rezervoar dok u periodima male količine RHE upotpunjuje proizvodnju. Također, trošak penala je veći u slučaju bez RHE što dovodi do manjeg profita. Integracija energije vjetra na tržištu električne energije zahtijeva određenu prognozu, odnosno predviđanje proizvodnje energije iz VE. Budući da je to prognozirana (predviđena) energija, moguće su razlike i pogreške u toj procjeni koje mogu dovesti do troškova zbog neisporučene energije. Zbog toga je u [80] predstavljen zajednički rad VE i RHE u svrhu smanjenja tih troškova, odnosno ispitano je može li rad RHE ublažiti troškove nastale zbog pogreške u procjeni proizvedene energije iz vjetra. Da bi se optimizirao zajednički rad, modelirana je nesigurnost u prognozi proizvodnje energije iz vjetra. Procjena nesigurnosti je uključena u optimizacijski proračun te su rezultati ukazali da RHE prilagođava svoju proizvodnju na način da se smanje troškovi nastali zbog pogreške u prognozi, odnosno dobivena ekonomska dobit opravdava kombinirani rad VE i RHE. Strategija rada sustava koji se sastoji od VE, TE i RHE koji trguju na tržištu za dan unaprijed i tržištu sekundarne regulacije dana je u [81]. Strategija uzima u obzir nekoliko parametara nesigurnosti, kao što su proizvodnja energije iz vjetra, tržišne cijene, energija regulacije. Rezultati pokazuju da koordinirani i zajednički

optimiziran rad VE, TE i RHE značajno poboljšava ukupni profit te smanjuje rizik. U [82] je opisan sličan problem nastao zbog pogreške u procjeni proizvodnje energije iz vjetra, odnosno optimiziran je dnevni problem proizvodnje hidroenergije za kaskadu od tri rezervoara, u kojoj jedna od HE ima reverzibilni rad, a uzimajući u obzir prognozu energije vjetra i cijena na tržištu za dan unaprijed. Analizirana je zarada koja proizlazi iz nesigurnosti od predviđanja proizvodnje energije iz vjetra. Pokazalo se da će hidrosustav zarađivati u vremenu kad se pojavi višak energije iz vjetra zbog toga što će tada RHE tu energiju koristiti za pumpanje vode iz donjeg u gornje jezero. Sustav će biti u gubitku kada mora nadoknaditi deficit energije iz vjetra, odnosno kada pretpostavljena energija iz vjetra bude veća od one stvarne. Slična tematika razrađena je i u [83], gdje se istraživao sustav od VE, TE, kaskadnog sustava HE i RHE te je cilj bio minimizirati trošak rada cijelog sustava uz predviđanje pogreške zbog vjetra. Zaključilo se da prisutnost RHE u promatranom sustavu značajno smanjuje negativni efekt predviđanja proizvodnje energije iz vjetra. Također, rad RHE i VE uz uvjet minimizacije fluktuacije izlazne energije da se spriječi diskontinuitet i nestabilnost proizvodnje uzrokovane od vjetra te maksimizira proizvodnja cijeloga sustava je prikazan u [84]. Simulacije ukazuju da tijekom kišne sezone hibridni sustav ima manje fluktuacije energije za razliku od sušne sezone. Zaključak je da prisutnost RHE može povećati iskorištenje energije vjetra bez ugrožavanja pouzdanosti sustava zbog toga što hidroenergija igra važnu ulogu u cjelokupnom hibridnom sustavu.

Članci u kojima autori istražuju utjecaj RHE na zajednički rad s FNE su [88-94]. U [88] su uspoređivana tri različita sustava: sustav samostalne plutajuće FNE, sustav samostalne RHE te sustav plutajuće FNE i RHE zajedno. Ustanovilo se da kombinirani sustav ima veliku mogućnost proizvodnje električne energije bez negativnih utjecaja na pouzdanost mreže. Nadalje, korištenje plutajuće FNE može istovremeno doprinijeti na uštedi prostornog zemljišta (ušteda prostora), očuvanju vodnih resursa zbog isparavanja te većoj proizvodnji električne energije zbog prirodnog hlađenja ćelija. Nadalje, hibridni sustav FNE i RHE s TE, uzimajući u obzir troškove goriva, troškove pokretanja te trošak zbog nemogućnosti davanja pune snage iz FNE predstavljen je u [89]. Uspoređena su tri sustava: sustav samo s TE, sustav s TE i FNE te sustav s TE, FNE i RHE. U drugom i trećem slučaju promatrao se još utjecaj instalirane snage RHE i različit udio energije iz FNE. Pokazalo se da u trećem slučaju RHE proizvodi energiju u vremenu vršnog opterećenja, a pumpa kad je prisutan višak energije u sustavu te na taj način doprinosi stabilnosti samog sustava, za razliku od ostalih promatranih sustava. Također, optimalni rad RHE i FNE promatran je u [90]. Radilo se nekoliko slučajeva, s obzirom na tipični

zimski i ljetni dan te s obzirom na različite veličine gornjeg rezervoara RHE, a cilj je bio minimizirati neisporučenu energiju. Ustvrdilo se da RHE može uvelike smanjiti postotak neisporučene energije te na taj način povećati pouzdanost sustava. Također, kao važan parametar se pokazala optimalna veličina gornjeg rezervoara RHE, jer će mali kapacitet prouzročiti ozbiljan gubitak opskrbe potrošača, a preveliki će biti neisplativ. Zajednički rad FNE, RHE, rezervoara te potrošača na farmi u ruralnom području istraživan je u [91] te je razvijen algoritam koji minimizira kupljenu energiju iz mreže. Rezultati eksperimenta pokazuju da se efikasnim upravljanjem RHE mogu smanjiti troškovi električne energije preuzete iz mreže, odnosno da su godišnji troškovi električne energije bitno smanjeni ugradnjom sustava RHE sa sustavom FNE. Autori su u [92] optimizirali rad hibridnog sustava koji se sastoji od FNE, RHE, dizel agregata te potrošača. RHE, osim pumpno–turbinskog režima, može raditi i kao akumulacijska HE. Zaključilo se da zajednički rad RHE i FNE može uvelike pomoći kod rješavanja problema fluktuirajuće proizvodnje iz FNE te na taj način omogućiti instalaciju veće snage FNE na mrežu. Pokazalo se da prisutnost RHE može smanjiti udio proizvodnje iz dizel agregata više nego sustav s akumulacijskim HE te na taj način smanjiti ukupni trošak sustava. Također, ustanovilo se da za obavljanje istih funkcija, veličina gornjeg rezervoara RHE može biti manja od veličine gornjeg rezervoara kod akumulacijske HE, što znači da se postojeće akumulacijske HE mogu prenamijeniti u RHE bez posebnih zahvata vezanih za veličinu rezervoara. U usporedbi uloge RHE u otočnom sustavu i sustavu gdje je spojena na krutu mrežu, RHE u otočnom sustavu ima veći doprinos kao proizvođač energije, dok u sustavu gdje je spojena na mrežu ima veću ulogu kao regulator opterećenja (u regulaciji energije).

Baterije

Brojni autori su ispitivali korisnost, uporabu te tehno-ekonomsku procjenu Li-ion baterija kao spremišta energije u EES-u i na tržištu električne energije, maksimizirajući pritom dobit te minimizirajući gubitke sustava [29-35]. U [29] maksimiziran je profit Li-ion baterija zajedno s FNE. Rezultat je pokazao da baterija uspješno radi arbitražu na tržištu za dan unaprijed te da aktivno sudjeluje u peglanju vršnog opterećenja i regulaciji energije zbog pogreške u predviđenoj proizvodnji iz FNE. Autori su u [30-32] istražili utjecaj cijena (na tržištu pomoćnih usluga) na rad i profit Li-ion baterija kao samostalan sustav [30] te u kombinaciji s ostalim opskrbljivačima [31, 32]. Ustvrdilo se da sustav Li-ion baterija može generirati zaradu na promatranom tržištu te da je ključno kretanje tržišnih cijena i cijena baterija s obzirom na pogodnosti pružanja usluga u promatranom tržištu [30]. Također, ustanovilo se da se s trenutnim

tržišnim cijenama i cijenama baterije ne može postići ekonomska zarada od samostalnog rada baterija, već sustav može biti održiv ako sudjeluju i ostali opskrbljivači energijom [31]. Nadalje, ekonomski održiv rad sustava za promatranu 2019. godinu nije moguć jer cijene na promatranom tržištu nisu dovoljne za pokrivanje gubitaka cjelokupnog sustava. Pretpostavljene cijene za 2025. godinu bit će dovoljne za stvaranje dobiti, ali uzimajući u obzir zajednički rad s drugim izvorima, a ne samostalni sustav baterija. U [33] je promatran sustav Li-ion baterija kao spremišta energije te FNE kao IOIE u distribucijskoj mreži. Ispitana je ekonomska dobit sustava baterija na tržištu pomoćnih usluga, s tim da su i varijacije tržišnih cijena uzete u obzir. Pokazalo se da sustav baterija može biti koristan u pružanju pomoćnih usluga povećavajući dobit samog sustava te fleksibilnost, sigurnost, pouzdanost i kvalitetu same mreže. Rad sustava Li-ion baterija kao spremišta energije s VE kao IOIE na nekoliko različitih tržišta uzimajući u obzir pogrešku u procjeni tržišnih cijena i proizvodnje iz VE, ispitan je u [34]. Iako unutarodnevno tržište nema nekog ekonomskog značaja, ovo tržište može biti korisno u periodima povećane proizvodnje iz VE. Također, sudjelovanje cjelokupnog sustava na tržištu pomoćnih usluga povećava profit skoro četverostruko za razliku od slučaja kad sustav ne sudjeluje na tom tržištu.

Ekonomska održivost NaS baterije koja sudjeluje na tržištu energije za dan unaprijed i tržištu pomoćnih usluga računata je u [98]. Rezultati su ukazali da ekonomska održivost nije zadovoljena te da bi ulagači u tehnologiju NaS baterije kao spremišta energije trebali biti poticani financijskim sredstvima. Nadalje, u [99] je također računata ekonomska održivost NaS baterije koja je promatrana kao spremište energije s ciljem smanjenja troška električne energije za krajnjeg potrošača (pasivnog korisnika). Rezultati su pokazali da ni u ovom slučaju ekonomska održivost nije zadovoljena jer je period vraćanja ulaganja duži od životnog vijeka baterije (s trenutnim cijenama energije) te da NaS baterija zbog visokih investicijskih troškova nije profitabilna u promatranom primjeru. Tehnologija NaS baterije pokazala se vrlo neisplativom kad su se uzeli u obzir troškovi rada i održavanja. NaS baterija je i u [100] razmatrana kao spremište energije, ali ovaj put s ciljem smanjenja troška rada TE, uzimajući u obzir razne prognoze proizvodnje energije iz VE. Zaključilo se da u promatranom slučaju, korištenje NaS baterije kao spremišta može smanjiti troškove sustava te smanjiti potrebnu proizvodnju iz TE. Autori su razvili model za optimalan rad NaS baterije koja radi u sustavu koji se sastoji od već spomenute baterije kao spremišta, FNE i električne mreže u [101]. Uspoređena su dva slučaja, jedan koji uzima u obzir bateriju u sustavu i drugi bez baterije. Rezultati su pokazali veći profit u slučaju s baterijom. Kombinirani rad NaS baterije s elektranom na gorivo, u cilju povećanja profita cjelokupnog sustava, istražen je u [102]. Uspoređivao se prihod dobiven zbrajanjem

prihoda od samostalnog rada baterije i elektrane, s prihodom dobivenim zajedničkim radom baterije i elektrane. Rezultati su ukazali da zajednički rad baterije i elektrane dovodi do većeg profita za razliku od pojedinačnog rada te iste baterije i elektrane.

Sustav olovnih baterija kao spremišta energije s ciljem bolje integracije vjetroenergije na tržištu električne energije promatran je u [103]. Autori su željeli maksimizirati dobit cjelokupnog sustava uzimajući u obzir, ne samo prodaju energije na tržištu, već i smanjenje troška zbog produljenja životnog vijeka baterija. Ustanovili su da je pravilnim radom baterije (ciklusa punjenje/pražnjenje) moguće uvelike produljiti životni vijek. U [104] je slično kao u [103] istraživani rad olovne baterije u maksimizaciji profita na tržištu energije za dan unaprijed, uzimajući u obzir životni vijek baterije. Baterija će često mijenjati svoj rad (punjenje ili pražnjenje) obavljajući energetska arbitražu, ali učestala promjena rada dovodi do smanjenog životnog vijeka baterija te na kraju do smanjenog profita. Rezultati su pokazali značajno smanjenje profita kad se uzeo u obzir trošak zbog smanjenja životnog vijeka baterije. Algoritam za optimalnu strategiju rada sustava koji se sastoji od FNE i sustava olovnih baterija kao spremišta energije s ciljem smanjenja fluktuacija iz FNE razvijen je u [105]. Ustanovilo se da je olovna baterija kao spremište energije dobro rješenje s gledišta investicijskih troškova. Primjena olovne baterije kao spremišta energije u sustavu koji se sastoji od potrošača, proizvodnih jedinica i baterije kao spremišta prikazana je u [106]. Zaključilo se da korištenje baterije kao spremišta energije ima utjecaj na promatrane sustave na način da su se postigle uštede za razliku od slučajeva kad nije bilo spremišta.

Slično kao i kod ostalih baterija, ekonomska održivost se istraživala i kod protočnih baterija (baterije promatrane kao spremišta energije) [107, 108]. U [107] ispitala se profitabilnost baterija na tržištu električne energije te u izoliranim sustavima s velikim udjelom energije iz IOIE. U slučaju rada u izoliranim sustavima, baterije su se pokazale korisnijima jer zajedno s IOIE smanjuju proizvodnju iz TE koji imaju visoke troškove goriva. Naime, korištenje protočnih baterija kao spremišta energije u izoliranim sustavima koji imaju visok udio energije iz IOIE smatra se dobrim rješenjem zbog njihovog dugog životnog vijeka. Također se pokazalo da prihod i ukupna profitabilnost sustava uvelike ovise o cijenama goriva. U [108] su rezultati ukazali na isplativ arbitražni rad baterija na tržištu električne energije te da će njihovo sudjelovanje u pomoćnim uslugama dovesti do značajnog povećanja zarade. Osim toga, vrijeme povrata investicijskih troškova se također pokazalo zadovoljavajuće. Rad protočne baterije s ciljem bolje integracije vjetroenergije u EES Španjolske istraživani je u [109]. Naime, korištenjem promatrane baterije nastoje se smanjiti odstupanja u proizvodnji VE nastale

pogrešnim predviđanjem proizvodnje. Ustanovilo se da korištenje već spomenutog baterijskog spremišta energije može značajno smanjiti nastala odstupanja. U [110] i [111] je pokazano da protočna baterija zbog svoje sposobnosti brzog odziva učinkovito sudjeluje u obavljanju pomoćnih usluga (posebice regulaciji frekvencije), peglanju vršnog opterećenja, kontroli jalove energije te da ekološka prihvatljivost i dostupnost materijala od kojih se radi spomenuta baterija čini ove baterije obećavajućim rješenjem za rad u spomenutim uslugama.

Supravodljivi sustav za pohranu magnetske energije

SMES se proučavao u svrhu regulacije frekvencije, regulacije napona i napona zajedno sa VE, regulacije proizvedene energije iz VE te za regulaciju napona u sustavu s VE u [112-115]. Dobiveni rezultati su pokazali vrlo učinkovito djelovanje SMES-a u smanjenju odstupanja frekvencije, koje je uzrokovano pojavom različitih opterećenja u sustavu. Također, SMES se pokazao učinkovitim rješenjem za stabilizaciju frekvencije i napona u sustavu s VE te u sustavu gdje se koristio u regulaciji proizvedene energije iz VE. Osim toga, pokazao se kao učinkovito rješenje za poboljšanje naponske stabilnosti.

Superkondenzatori

Autori u [44-47] opisuju rad superkondenzatora u njihovim različitim primjenama. U [44] autori su koristili superkondenzatore za smanjenje fluktuacije napona i snage VE spojenih na mrežu. Rezultati ukazuju da su superkondenzatori pouzdano rješenje u promatranim slučajevima [44]. U [45, 46] autori su također proučavali rad superkondenzatora s ciljem smanjenja fluktuacija vjetera te su potvrdili njihovu korisnost u promatranom slučaju. U [47] autori su proučavali korištenje superkondenzatora za regulaciju frekvencije. Pokazalo se da je korištenje superkondenzatora u promatranom slučaju praktično i korisno rješenje te da donosi značajna poboljšanja u sustavu.

Tehnologija zamašnjaka

U [116] autori su proučavali rad zamašnjaka kao spremnika energije u svrhu smanjenja troška proizvodnje iz dizel agregata u sustavu koji se sastoji od zamašnjaka, dizel agregata, VE i mreže. Pokazalo se da korištenje zamašnjaka u promatranom sustavu doprinosi financijskoj uštedi. Rad zamašnjaka u regulaciji energije i frekvencije VE proučavan je u [117]. Zaključilo

se da zamašnjak u kombinaciji s VE može predstavljati koordiniran rad sustava te da može doprinijeti boljem radu i većoj koristi samog sustava. U [118] razvijen je model koji daje optimalnu strategiju rada zamašnjaka u svrhu pružanja usluge regulacije frekvencije na dva različita tržišta. Dobiveni rezultati pokazuju da zamašnjak s optimiziranom strategijom rada pruža zajamčenu uslugu bez iznimke. Autori su u [119] istraživali rad zamašnjaka u regulaciji frekvencije. Naime, kada se pojavi višak energije u sustavu ona se sprema u obliku kinetičke energije u zamašnjaku. Rezultati potvrđuju da je tehnologija zamašnjaka korisno rješenje u pružanju regulacije frekvencije. Utjecaj rada zamašnjaka kao spremišta energije u otočnom sustavu koji se sastoji od dizel generatora, hidrogeneratora i VE ispitan je u [120]. Uspoređivao se slučaj s i bez zamašnjaka u promatranom sustavu. Pokazalo se da prisutnost zamašnjaka uvelike poboljšava stabilnost samoga sustava, također omogućuje veće iskorištavanje energije i IOIE te smanjuje vrijeme korištenja dizel agregata, odnosno smanjuje troškove rada sustava.

Tehnologija komprimiranog zraka

CAES tehnologija kao samostalni sustav koji sudjeluje na tržištu pod različitim okolnostima opisana je u [121-126]. U [121] i [122] autori su predstavili model u optimizacijskoj tehnici kombiniranog cjelobrojnog linearnog programiranja koji maksimizira profit CAES sustava na DAM, ASM i dnevnom tržištu. Funkcija cilja je zarada od prodaje i kupovine energije na promatranim tržištima uzimajući u obzir i troškove rada sustava. Rezultati su pokazali da se na ASM postiže veći dio zarade, za razliku od DAM i dnevnog tržišta. Rad CAES tehnologije s obzirom na promjenjivost tržišnih cijena promatran je u [123] i [124]. Funkcija cilja je zarada na promatranom DAM uzimajući u obzir prodanu i kupljenu energiju te troškove rada CAES sustava. Autori su potvrdili primjenjivost svoje metode [124] te su varirajući cijene dobili tri različita scenarija. Ustanovili su da s obzirom na korištene scenarije (cijene) zarada od arbitraže može uvelike varirati.

Zajednički rad CAES-a i FNE istraživan je u [127] i [128]. U [127] se pokazalo da je povrat ulaganja u cjelokupni sustav puno manji od životnog vijeka promatranog sustava kad su se uzeli u obzir svi troškovi. CAES sustav može poslužiti u boljoj integraciji FNE u EES. Autori su prikazali kombinirani rad FNE i CAES sustava sa mrežom u [128]. Naime, funkcija cilja je zarada od prodaje energije u mrežu, a pojava nedostatka energije se smatra gubitkom profita. Energija iz FNE se koristi za opskrbu potrošača (mreže), a ako postoji višak proizvedene energije, taj višak se koristi za skladištenje zraka u CAES sustav. Kada FNE ne proizvodi dovoljno energije za potrebe mreže, manjak energije se nadoknađuje iz CAES-a, a kad se ukupna

potrošnja ne može zadovoljiti ni iz CAES-a ni iz FNE to se smatra gubitkom profita. Autori su ustvrdili da je postignuta veća dobit u zajedničkom radu FNE i CAES-a, za razliku od samostalnog rada FNE.

Rad CAES-a u kombinaciji s vjetrom kao IOIE opisan je u [129-136]. U [129] prikazana je optimalna strategija rada sustava koji se sastoji od CAES-a, VE i mreže. Funkcija cilja je profit od prodaje energije iz vjetra i CAES-a, uzimajući u obzir troškove rada i održavanja sustava. Ispostavilo se da rad, a time i isplativost sustava uvelike ovisi o parametrima sustava poput koeficijenta korisnosti, tržišnih cijena te vjetra. Autori su promatrali CAES u funkciji spremišta s ciljem smanjenja fluktuacije vjetroenergije u [130]. Osim CAES-a i VE, sustav ima i TE koji sudjeluju u proizvodnji energije. Funkcija cilja su 24-satni troškovi rada cjelokupnog sustava, odnosno, trošak rada, pokretanja i zaustavljanja TE te trošak rada CAES-a. Izrađene su 2 analize s obzirom na prisutnost CAES-a kao spremišta (s i bez). Rezultati su pokazali da korištenje CAES-a kao spremišta energije značajno utječe na smanjenje troškova proizvodnje cjelokupnog sustava te se tehnologija CAES-a pokazala korisnim rješenjem za smanjenje vršnog opterećenja. U [131] je također promatran sustav CAES-a i VE s ciljem maksimizacije profita na tržištu energije. Algoritam određuje raspodjelu energije iz VE i CAES-a s obzirom na period dana (visoka ili niska potražnja za energijom) te stanja napunjenosti spremnika CAES-a. Energija iz CAES-a i VE se šalje u mrežu u slučaju perioda dana s visokim cijenama, dok se energija iz VE koristi za spremanje zraka u CAES tijekom perioda dana s niskim cijenama. Ako je stanje napunjenosti CAES-a 100%, a period niskih cijena, onda će cijela energija iz VE služiti za opskrbu mreže dok će se u periodu visokih cijena nastojati cijela energija injektirati u mrežu. Rezultati istraživanja pokazuju da je korištenje CAES-a kao spremišta energija učinkovita metoda za smanjenje fluktuacije energije iz VE te da čini energiju iz vjetra bolje iskoristivom.

U [132] autori su istraživali rad CAES-a s TE i VE na način da se namjerava maksimizirati dnevni profit na tržištu, odnosno smanjiti troškove rada sustava. Rezultati su pokazali da prisutnost CAES-a znatno utječe na povećanje profita u prvom slučaju te na smanjenje troškova sustava u drugom slučaju. Slično kao u [132], u [133] je također promatran sustav TE, VE i CAES s ciljem maksimizacije profita na DAM i ASM. Došlo se do sličnih rezultata kao u [132], odnosno da CAES može smanjiti troškove rada sustava i povećati njegovu profitabilnost.

U [134-136] istraživani su rad CAES-a kao spremišta energije u kombinaciji s visokim udjelom različitih IOIE [134] te vjetrom [135, 136] s ciljem maksimizacije profita i smanjenja ukupnih troškova sustava pod različitim uvjetima i okolnostima. Pokazalo se da CAES može:

- efektivno obavljati energetska arbitraža

- povećati ukupni prihod
- smanjiti emisije CO₂
- smanjiti troškove sustava
- omogućiti bolju integraciju IOIE u EES.

1.3. Hipoteza

S obzirom na istraženu literaturu, došlo se do zaključaka da nema publiciranog relevantnog istraživanja koji se bavi univerzalnim modelom spremišta, već da svaki optimizira jedan određeni tip te da nitko ne promatra uklapanje spremišta u realni mješoviti elektroenergetski sustav u kojem su pored IOIE prisutne parne, plinske i kogeneracijske TE (TE-TO), protočne i akumulacijske HE, mogućnost uvoza i izvoza energije itd.

Cilj je napraviti model koji se ne bavi specifičnostima pojedine tehnologije, već se koncentrira na optimiranje rada spremišta prvenstveno za dnevni ciklus punjenja i pražnjenja. Model će omogućiti optimiranje rada različitih tehnologija spremanja električne energije u realnim uvjetima rada mješovitih elektroenergetskih sustava u tržišnim uvjetima. Spremište energije prihod može ostvariti kroz arbitražu i različite usluge. Takav jedinstveni model će biti pogodan za različite proračune kao što su:

- ispitivanje isplativosti investiranja u određeno spremište
- vrednovanje raznih parametara spremišta
- usporedba ravnopravnih tehnologija spremanja energije
- proračun optimalne veličine spremišta energije...

Model će moći koristiti neovisni proizvođači energije (engl. *generation companies* - GENCOs) koji u svom portfelju, pored pojedinih proizvodnih postrojenja imaju i mogućnost pohrane energije, a moći će se koristiti za centralno planiranje pogona i razvoja sustava, npr. za potrebe operatora sustava.

Uzimajući u obzir sve rečeno, postavljene su dvije hipoteze:

1. Optimalni rad spremišta energije u EES-u koji radi u tržišnim uvjetima ovisi o nizu faktora: o karakteristikama spremišta energije, strukturi i zahtjevima elektroenergetskog sustava, varijaciji cijena električne energije, cijeni pomoćnih usluga itd. Za pojedini EES s definiranim potrebama za isporukom električne energije i s određenom strukturom

proizvodnih jedinica te poznatim cijenama moguće je odrediti optimalni režim rada spremišta energije u promatranom periodu. Kako je niz veličina unaprijed nepoznat (cijene energije, hidrologija,...) mora se primijeniti stohastički pristup.

2. Predloženi model optimalnog rada spremišta energije, uz uvažavanje prethodno navedenih ograničenja može računati optimalni broj sati u režimu pumpanja i pražnjenja, broj sati u mirovanju, sate rada za pružanje pojedinih usluga... Model spremišta mogu koristiti proizvodne kompanije koje u svom portfelju imaju više elektrana i spremnik energije te operatori EES-a za potporu pružanja pomoćnih usluga. Modelom se može računati optimalan rad postojećeg spremišta, optimalna veličina izgradnje spremišta, izbor tipa spremišta, itd.

1.4. Očekivani znanstveni doprinosi

Očekivani znanstveni doprinosi ove disertacije su:

- razvoj izvornog općeg modela spremišta energije koji računa optimalni način rada spremišta u realnim tržišnim uvjetima sudjelujući u energetske arbitraži i pružanju pomoćnih usluga
- integracija modela spremišta energije sa zahtjevima potrošača i mogućnostima proizvodnih jedinica sustava u jedinstveni integrirani model koji omogućava određivanje optimalnog načina rada spremišta energije u promatranom periodu
- primjena integriranog modela u analizama opravdanosti gradnje spremišta energije, definiranju optimalne veličine spremišta u danim uvjetima te definiranju optimalnog načina rada spremišta.

1.5. Pregled strukture disertacije

Nakon uvodnih razmatranja različitih tehnologija skladištenja energije i pregleda dosadašnjih istraživanja, drugo poglavlje disertacije sadrži opis modela za optimizaciju rada spremišta te nomenklaturu korištenu u modelu. Detaljno je opisana funkcija cilja modela te je objašnjen svaki član funkcije cilja. Također, detaljno su opisana ograničenja modela. Ograničenja su podijeljena u 4 grupe: ograničenja na tokove energija spremišta, ograničenja na tokove energija ostalih proizvodnih jedinica, ograničenja na plasman energije na tržištu pomoćnih usluga te ograničenja na tokove energija cjelokupnog sustava.

U trećem poglavlju prikazane su primjene modela za optimizaciju rada spremišta energije. Napravljeno je nekoliko različitih simulacija te je prikazan utjecaj različitih parametara spremišta i karakteristika sustava na optimalni rad spremišta.

U četvrtom poglavlju iznesen je zaključak nakon kojeg slijedi popis literature koja je korištena prilikom izrade disertacije. Na kraju je dan životopis doktoranda.

2. OPIS MODELA ZA OPTIMIZACIJU RADA SPREMIŠTA ENERGIJE

Model za optimizaciju rada spremišta energije, predložen u ovom radu, ima za cilj:

- obuhvatiti sve tehnologije spremanja energije (za neke tehnologije spremanja neki članovi u modelu će biti zanemareni)
- omogućiti modeliranje usluga koje u realnim tržišnim uvjetima mogu obaviti spremišta energije (arbitraža i pomoćne usluge) i biti kompetitivni konkurenti
- uvažiti niz ograničenja u radu spremišta (ograničeni plasman radi drugih pružatelja pomoćnih usluga sustava i proizvodnje energije iz drugih izvora...)
- uzeti u obzir realne mogućnosti drugih izvora energije, OIE kroz moguću proizvodnju energije i raspored te proizvodnje, a neobnovljivih kroz instaliranu snagu, troškove pokretanja, itd.

Razvojem općeg modela za optimizaciju rada spremišta energije želi se omogućiti korisniku razne simulacije i optimizacije spremišta energije u tržišnim uvjetima. Prilagodбом općeg modela može se simulirati rad spremišta energije koja se najčešće koriste za potrebe EES-a. Pored spremišta, model uzima u obzir rad ostalih najčešće korištenih proizvodnih jedinica tako što je modeliran rad po jednog proizvodnog postrojenja koje se smatra aproksimacijom svih ostalih proizvodnih postrojenja tog istog tipa.

Dakle, predloženim modelom može se simulirati rad:

- samog spremišta (ako zanemarimo proizvodnju svih ostalih proizvodnih jedinica)
- spremišta i nekih dodatnih izvora (od interesa GENCO kompanijama)
- cjelokupnog sustava sa svim izvorima energije (interesantno za operatora sustava).

Parametri važni za rad cjelokupnog sustava za dan unaprijed (cijene, hidrologija, sunčevo zračenje, vjetar...) su poznati ili ih je moguće pretpostaviti, a budući da većina spremišta podešava režim rada na dnevnoj bazi, predstavljeni model je također prilagođen za dnevni režim punjenja i pražnjenja te je uzet jedan sat kao osnovni vremenski korak, odnosno snaga punjenja ili pražnjenja spremišta je konstantna tijekom jednog sata. Cilj je maksimizirati dnevni приход cjelokupnog sustava.

Rad spremišta je nužno sagledati u nizu mogućih kombinacija zahtjeva potrošača, cijena energije, proizvodnje ostalih izvora itd., odnosno za donošenje relevantnih zaključaka o optimalnim parametrima i mogućnostima spremišta nužno je sagledavanje njegova rada u dužem periodu. Algoritam uzastopnom optimizacijom dnevnog načina rada optimira željeni broj dana, što npr. za ciklus od 365 dana u konačnici rezultira optimalnim godišnjim režimom rada. Godina dana predstavlja period koji obuhvaća većinu stohastičkih pojava kao cjelinu te se nakon godinu dana te pojave uglavnom ponavljaju.

U liberaliziranim tržištima električne energije spremišta energije mogu ostvarivati prihod na raznim tržištima i kroz različite usluge. Spremišta energije mogu kupovati i prodavati energiju na tržištima poput unutardnevnog tržišta (engl. *intraday market*), DAM i ASM tržišta, ali i dugoročnim bilateralnim ugovorima. Pod pojmom pomoćnih usluga može se smatrati širok raspon usluga ugovorenih između pružatelja usluga i operatora sustava u svrhu ispravnog funkcioniranja sustava. Terminologija pomoćnih usluga se razlikuje po pojedinim dijelovima svijeta. Također, pomoćne usluge u jednom sustavu ne moraju se klasificirati kao pomoćne usluge u nekom drugom sustavu. Kod plaćanja izvršenja pomoćne usluge posebno se obračunava angažirana snaga, a posebno utrošena energija. Pružatelji usluga (npr. spremišta energije) podnose svoje ponude koje se sastoje od komponente snage i energije. Pružatelja usluge kojeg operator sustava odabere za pružanje određene usluge ima zaradu od rezervirane snage za odabranu uslugu, a također i od energije koju proizvodi u toj usluzi ako je odabran da proizvodi.

Rad spremišta u tržišnim uvjetima je detaljno modeliran uzimajući u obzir energetske arbitražu, pomoćne usluge (rezerva snage za tercijarnu regulaciju frekvencije za uravnoteženje EES-a i rezerva snage za tercijarnu regulaciju frekvencije za sigurnost EES-a te troškove rada i održavanja spremišta. Rezerva snage za uravnoteženje EES-a će se, sukladno praksi, skraćeno zvati regulacija prema gore i regulacija prema dolje (engl. *regulation up-reg-up*, *regulation down-reg-down*), a rezerva snage za sigurnost EES-a će se skraćeno zvati havarijska rezerva. Rad ostalih proizvodnih jedinica je jednostavnije modeliran uzimajući u obzir prodaju energije na tržištu energije te troškove rada i pokretanja tih jedinica. Uz model spremišta i model proizvodnih jedinica uzima se u obzir uvoz i izvoz energije. Osnovni zahtjev koji se postavlja pred sve proizvodne jedinice u sustavu je da u svakom satu snaga potrošača mora biti zadovoljena. Ostali zahtjevi i uvjeti cjelokupnog sustava bit će objašnjeni u nastavku.

Trošak spremišta se općenito sastoji od troškova izgradnje (investicije) te troškova rada i održavanja. Kako predloženi model optimizira pogon spremišta, model razmatra samo troškove rada i troškove održavanja (engl. *Operations & Maintenance costs*). Troškovi investicije, koji

ne ovise o pogonu spremišta, a značajno variraju o tehnologiji spremišta, karakteristikama spremišta itd., uvijek se mogu obuhvatiti u posebnim analizama kao što su analize isplativosti ulaganja, proračuna vremena za povrat ulaganja u spremište, itd.

Predloženi model je razvijen u optimizacijskoj tehnici kombiniranog cjelobrojnog linearnog programiranja (engl. *mixed integer linear programming* - MILP). Model je, kao i svaki optimizacijski model, dan funkcijom cilja te ograničenjima. Ograničenja koja tvore model su linearna u obliku jednadžbi i nejednadžbi. Funkcija cilja i ograničenja se zadaju preko varijabli odluka i konstanti, a svaka varijabla odluke ima svoju gornju i donju granicu. Tipovi varijabli su realni ili cjelobrojni. S obzirom na funkciju cilja, a zadovoljavajući sva ograničenja u svakom satu, algoritam računa optimalno rješenje odabirući optimalne vrijednosti varijabli odluka unutar njihovih granica. Matematički se može izraziti da je kombinirano cjelobrojno linearno programiranje problem zadan sa:

- vektorom funkcije cilja $f(x)$ i vektorima vrijednosti donjih (lb) i gornjih granica (ub) varijabli odluka
- matricom nejednakosti (A) i jednakosti (Aeq)
- vektorima b i beq
- vektorom ($intcon$) varijabli koje su cjelobrojnog tipa

što je dano izrazom (2.1).

$$\min f(x) \begin{cases} intcon \\ A \cdot x \leq b \\ Aeq \cdot x = beq \\ lb \leq x \leq ub \end{cases} \quad (2.1)$$

Nakon definiranja funkcije cilja, matrica A i Aeq te vektora b , beq , lb , ub te $intcon$, pozivanjem izraza 2.2 (engl. *solver*) u Matlab-u, algoritam daje optimalno rješenje za postavljene uvjete [137].

$$intlinprog(f(x), intcon, A, b, Aeq, beq, lb, ub, options) \quad (2.2)$$

U daljnjem nastavku detaljno je opisano modeliranje rada spremišta i ostalih proizvodnih jedinica zajedno sa svim ograničenjima.

2.1. Funkcija cilja

Funkcija cilja dana je izrazom (2.3). Indeksi n i t u funkciji cilja označavaju dan i sat. Algoritam maksimizira dnevnu novčanu dobit za N dana, što rezultira godišnjom novčanom dobiti ako je $N=365$. Na optimalni rad spremišta utječe proizvodnja ostalih proizvodnih jedinica (TE, HE, IOIE, ...) pa funkcija cilja obuhvaća i njihovu proizvodnju.

Obzirom na složenost funkcije cilja (suma niza članova), prvo će se objasniti značenje pojedinih varijabli i konstanti u svakom članu, a potom što predstavlja svaki pojedini član. Popis korištenih varijabli i konstanti je abecednim redom ponovno dan u poglavlju 2.3 radi lakšeg praćenja rada.

$$\begin{aligned}
& \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} h_{n,t,1} \cdot ek_1 \cdot c_{n,t,1} + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} sb_{n,t,1} \cdot \eta \cdot h_{n,t,1} \cdot ek_1 \cdot c_{n,t,1}^e \\
& + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} h_{n,t,2} \cdot ek_2 \cdot c_{n,t,2} - \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} sb_{n,t,2} \cdot \eta \cdot h_{n,t,2} \cdot ek_2 \cdot c_{n,t,2}^e \\
& + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} h_{n,t,3} \cdot ek_3 \cdot c_{n,t,3} + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} sb_{n,t,3} \cdot \eta \cdot h_{n,t,3} \cdot ek_3 \cdot c_{n,t,3}^e \\
& + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} \eta \cdot h_{n,t,4} \cdot ek_4 \cdot c_{n,t,4}^e - \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} p_{n,t} \cdot ekp \cdot c_{n,t,4}^e - \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} k_1 \\
& - \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} k_2 \cdot t_{n,t}^r - \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} k_3 \cdot E_{n,t} - \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} k_4 \cdot t_{n,t}^{su} - \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} k_5 \cdot t_{n,t}^{sd} \\
& + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} (terpa_{n,t} \cdot (c_{n,t,4}^e - c_{terpa}) - k_{-terpa_{n,t}} \cdot c_{terpa}^{su}) \\
& + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} (terpl_{n,t} \cdot (c_{n,t,4}^e - c_{terpl}) - k_{-terpl_{n,t}} \cdot c_{terpl}^{su}) \\
& + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} (tertop_{n,t} \cdot (c_{n,t,4}^e - c_{tertop}) - k_{-tertop_{n,t}} \cdot c_{tertop}^{su}) \\
& + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} (prot_{n,t} \cdot ek_5 \cdot (c_{n,t,4}^e - c_{prot}) - k_{-prot_{n,t}} \cdot c_{prot}^{su}) \\
& + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} (aku_{n,t} \cdot ek_6 \cdot (c_{n,t,4}^e - c_{aku}) - k_{-aku_{n,t}} \cdot c_{aku}^{su}) \\
& + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} fne_{n,t} \cdot c_{n,t,4}^e + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} ve_{n,t} \cdot c_{n,t,4}^e - \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} uvoz_{n,t} \cdot c_{-uvoz_{n,t}} \\
& + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} izvoz_{n,t} \cdot (c_{-izvoz_{n,t}} - c_{n,t,4}^e) - \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} E_{n,t}^{nap} \cdot c_{-pen}
\end{aligned} \tag{2.3}$$

Spremište, kako je već ranije istaknuto, može ostvarivati zaradu na raznim uslugama, pa je u varijablama h , c i sb treći indeks oznaka usluga, i to:

- 1 - usluga rezerve snage za uravnoteženje EES-a prema gore
- 2 - usluga rezerve snage za uravnoteženje EES-a prema dolje
- 3 - usluga rezerve snage za sigurnost EES-a (havarijska rezerva)
- 4 - proizvodnja energije na dan unaprijed tržištu.

Svi članovi u funkciji cilja imaju dimenziju u novčanim jedinicama (€). Umnožak varijabli $h_{n,t,z}$ i ek_z u prvih sedam članova funkcije cilja je energija spremišta za uslugu z u danu n i satu t . Analogno tome, umnožak $p_{n,t}$ i ek_p daje energiju punjenja spremišta u danu n i satu t . Navedeni umnošci se još množe s pripadnom cijenom usluge (€/MWh). Same varijable $h_{n,t,1}$ do $h_{n,t,4}$ te $p_{n,t}$ predstavljaju tok energije u spremištu, ali izražene u prirodnim jedinicama za određenu tehnologiju spremišta, a ek_1 do ek_4 pripadne energetske koeficijente. Npr. za RHE i spremišta na komprimirani zrak, varijable $h_{n,t,z}$ i $p_{n,t}$ je volumen fluida za pojedinu uslugu u svakom satu (tj. m³ vode, odnosno zraka), a ek_z je konstanta koja predstavlja koeficijent pretvorbe toka fluida u energiju izražen u MWh/m³ za navedene dvije tehnologije. Za baterije se varijable $h_{n,t,z}$ i $p_{n,t}$ računaju u MWh, a energetske koeficijenti su bezdimenzionalne konstante.

U (2.3) korištene su sljedeće oznake za cijene:

$c_{n,t,z}$ - cijena po kojoj spremište nudi zakup snage usluge z ($z=1, 2, 3$)

$c_{n,t,z}^e$ - cijena energije usluge z ($z=1, 2, 3, 4$)

$c_{uvoz,n,t}$ - cijena uvozne energije

$c_{izvoz,n,t}$ - cijena izvoza energije.

Konstante $sb_{n,t,1}$, $sb_{n,t,2}$, $sb_{n,t,3}$ označavaju satne vjerojatnosti (između 0 i 1) da će spremište biti angažirano da sudjeluje u usluzi regulacije prema gore i dolje te havarijske rezerve. Vjerojatnosti se računaju posebnim algoritmom koji je objašnjen u nastavku.

Koeficijent η (koeficijent učinkovitosti spremišta, engl. *round-trip efficiency*) odnosi se na učinkovitost punjenja i pražnjenja spremišta. Ako spremišta pohranjuju istosmjernu energiju i deklariraju svoju korisnost kao DC-DC punjenje/pražnjenje, dodatni gubici transformacije se moraju uzeti u izračun η .

Dakle, u funkciji cilja prva dva člana se odnose na prihod od usluge regulacije prema gore (komponente snage i energije), dok se treći i četvrti član odnose na regulaciju prema dolje. U

usluzi regulacije prema dolje, vlasnik spremišta ima zaradu od komponente snage, ali i gubitak za komponentu energije, tj. gubitak za neproizvedenu energiju kad je angažiran za sudjelovanje u spomenutoj usluzi. Stoga 3. član ima pozitivan predznak, a 4. član ima negativan predznak. Peti i šesti član se odnose na prihod od havarijske rezerve, dok se sedmi i osmi izraz odnose na energetske arbitraže, tj. na prodaju i kupovinu energije (za punjenje spremišta) na tržištu.

U predloženom modelu sljedećih 5 članova koji se odnose na troškove spremišta predstavljaju:

- fiksni trošak
- trošak ovisan o trajanju pogona
- trošak ovisan o proizvedenoj energiji spremišta
- trošak pokretanja spremišta (engl. *start-up cost*)
- trošak zaustavljanja rada spremišta (engl. *shut-down cost*).

Konstanta k_1 predstavlja iznos fiksnog troška (€) neovisnog o proizvodnji, a u predloženom modelu se izražava na satnoj osnovi (9. član u funkciji cilja). Glavni dio fiksnog troška čini trošak investicije koji se jako razlikuje za razne tipove spremišta. Obično je on zadan na godišnjem nivou te ga je u modelu potrebno podijeliti sa 8760. Konstanta k_2 (€) se odnosi na trošak ovisan o radu te se uzima u obzir samo kada spremište radi, tj. proizvodi ili puni. Indikator rada spremišta je varijabla $t_{n,t}^r$ koja poprima vrijednost 1 kada spremište radi, odnosno 0 kada spremište nije u pogonu (10. član u funkciji cilja). Konstanta k_3 (€/MWh) se odnosi na trošak spremišta ovisan o proizvedenoj energiji, a varijabla $E_{n,t}$ računa ukupno proizvedenu energiju spremišta (11. član u funkciji cilja). Konstanta k_4 (€/pokretanju) se odnosi na trošak pokretanja spremišta, a $t_{n,t}^{su}$ je indikator pokretanja spremišta (12. član u funkciji cilja). Konstanta k_5 (€/zaustavljanju) se odnosi na troškove zaustavljanja spremišta, dok je $t_{n,t}^{sd}$ indikator zaustavljanja spremišta (13. član u funkciji cilja).

Prihod od rada klasičnih elektrana poput parne, plinske TE, kogeneracijske TE te protočne i akumulacijske HE (14. do 18. član u funkciji cilja) modelira se na sličan način. Modelira se po jedna elektrana svakog tipa koja predstavlja sumarnu proizvodnju svih elektrana toga tipa i koja ima prosječne troškove pogona i pokretanja. Sumarna angažirana energija parne, plinske i kogeneracijske TE u svakom satu je predstavljena varijablama $terpa_{n,t}$, $terpl_{n,t}$, $tertop_{n,t}$. Proizvodnja protočne i akumulacijske HE (varijable $prot_{n,t}$, $aku_{n,t}$) se izražava u milijunima m^3 vode te potom množi s energetske koeficijentom ek_5 odnosno ek_6 (dimenzija MWh/($10^6 m^3$)) za dobivanje proizvodnje u MWh.

Specifični trošak rada navedenih tipova elektrana (c_{terpa} , c_{terpl} , c_{tertop} , c_{prot} , c_{aku}) (€/MWh) te trošak pokretanja (c_{terpa}^{su} , c_{terpl}^{su} , c_{tertop}^{su} , c_{prot}^{su} , c_{aku}^{su}) s dimenzijom (€/pokretanju) su zadane konstante u modelu. Indikatori $k_{terpa_{n,t}}$, $k_{terpl_{n,t}}$, $k_{tertop_{n,t}}$, $k_{prot_{n,t}}$, $k_{aku_{n,t}}$ računaju se posebnim algoritmom (koji će biti opisan u potpoglavlju 2.2.2.), a predstavljaju broj novopokrenutih agregata odgovarajućih proizvodnih jedinica. Prema tome, 14.-18. član se odnose na prihode ostvarene proizvodnjom navedenih tipova elektrana.

Proizvodnja IOIE, odnosno FNE i VE, dana je varijablama $fne_{n,t}$ i $ve_{n,t}$. U modelu su zanemareni troškova rada i pokretanja ovih proizvodnih jedinica. Slijedi da se 19. i 20. član u funkciji cilja odnose na prihode od proizvodnje FNE i VE.

Varijable $uvoz_{n,t}$ i $izvoz_{n,t}$ odnose se na energiju uvoza i izvoza. Dobit od izvoza proizvedene energije (predzadnji član u funkciji cilja) se računa kao izvezena energija u svakom satu pomnožena s razlikom cijena izvoza i prodajne cijene energije (jer je energija koja se izvozi već obračunata kroz proizvodnju ostalih proizvodnih jedinica).

Zadnji član u (2.1) odnosi se na gubitak dobiti zbog penala koji se plaćaju ako je energija u jednom satu koju GENCO proizvodi manja od ugovorene energije koju treba isporučivati. Naime, GENCO najčešće sklapa ugovor s operatorom sustava o minimalnom iznosu energije koju treba u svakom satu isporučivati bez plaćanja penala. Varijabla $E_{n,t}^{nap}$ je energija koja se naplaćuje, odnosno negativna razlika proizvedene energije GENCO-a i ugovorene energije s operatorom sustava. Cijena po kojoj se plaćaju penali označena je sa c_{pen} (€/MWh).

2.2. Ograničenja

Kako je u predloženom modelu za optimizaciju rada spremišta definirano niz ograničenja, ona su podijeljena i grupirana u nekoliko skupina.

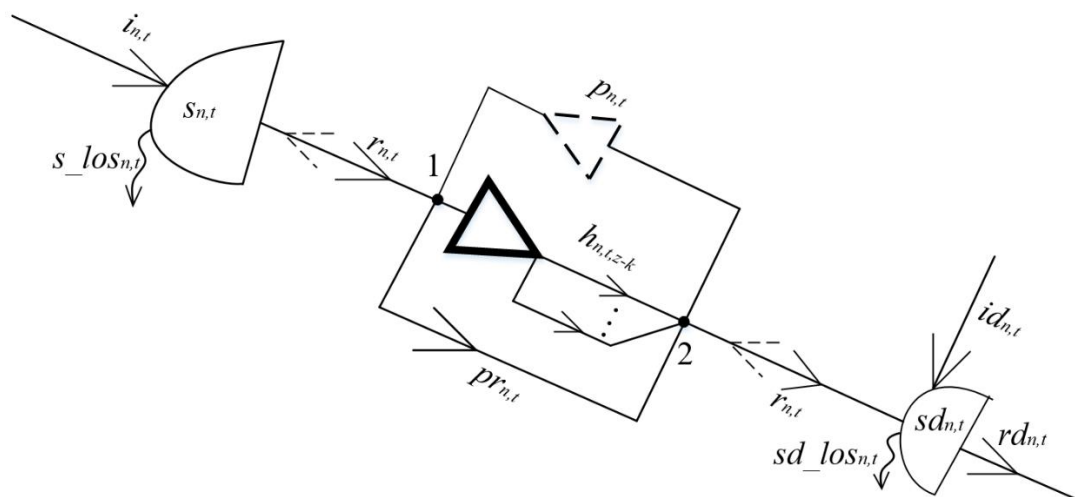
2.2.1. Ograničenja na tokove energija spremišta

Energija punjenja spremišta ($p_{n,t}$), odnosno pražnjenje i realizacije raznih usluga ($h_{n,t,z}$), opisani u funkciji cilja, podliježu raznim ograničenjima. Tokovi energija najbolje se mogu sagledati na primjeru reverzibilne hidroelektrane jer obuhvaća sve tokove korištene u modeliranju samog spremišta. Stoga se ovaj model, prikazan na slici 2.1, može koristiti kao općeniti model tokova energije u radu spremišta bez sagledavanja ostalih izvora energije. Kod

modeliranja tokova energije nekih drugih tipova spremišta u pogonu, dio tokova se može zanemariti, a pomoću energetskeg koeficijenta (ek_1 - ek_4) prilagoditi jedinice.

Model spremišta energije ima svoju gornju i donju akumulaciju energije ($s_{n,t}$ i $sd_{n,t}$), dotoke energije u te akumulacije ($i_{n,t}$, $id_{n,t}$), ispuste iz gornje i donje akumulacije ($r_{n,t}$ i $rd_{n,t}$) i gubitke gornje i donje akumulacije ($s_los_{n,t}$ i $sd_los_{n,t}$). Stanja i ispusti iz obje akumulacije su varijable odluke čije se optimalne vrijednosti za svaki sat određuju optimizacijskim postupkom, dok su dotoci i gubici za svaki sat zadane ulazne vrijednosti (konstante). Gornja akumulacija energije je trenutno spremljena energija koja se modelira za sva spremišta, a maksimalna vrijednost varijable $s_{n,t}$ je zapravo kapacitet (veličina) akumulacije. Donja akumulacija je dodatno ograničenje koliko se energije može vratit u proces, pri čemu baterija ili CAES nemaju to ograničenje. Gubicima energije (iz obje akumulacije) se modeliraju npr. gubici radi isparavanja i procjeđivanja vode kroz stjenke jezera kod RHE te općenito samopražnjenje kod ostalih spremišta energije.

Ispusti, odnosno tokovi energije iz gornje akumulacije ($r_{n,t}$) u svakom satu, koji mogu biti dvosmjerni, pored tokova energije za punjenje ($p_{n,t}$) i pražnjenje ($h_{n,t,z}$), sadrže i varijablu obilaznog toka energije ($pr_{n,t}$) kada se dio spremišta prazni bez proizvodnje ili plasmana proizvedene energije, npr. preljev kod RHE. Kod modeliranja RHE s konstantnom brzinom pumpanja (crpka pokretana sinkronim motorom), varijabla $p_{n,t}$ postaje konstanta, a kod promjenjive brzine pumpanja (crpka pokretana asinkronim motorom) $p_{n,t}$ je varijabla ograničena minimalno dozvoljenom ($p_{n,t}^l$) i nazivnom snagom pumpe ($p_{n,t}^u$).



Slika 2.1 Shema tokova energije prilikom rada spremišta

Gornja i donja akumulacija energije zadovoljavaju satni balans energije u ovisnosti o dotoku energije i gubicima energije u pojedinu akumulaciju. Balans energije za gornju i donju akumulaciju te za čvor 2, s obzirom na sliku 2.1, dan je sljedećim ograničenjima:

$$s_{n,t} = s_{n,(t-1)} - r_{n,t} - s_los_{n,t} + i_{n,t} \quad (2.4)$$

$$sd_{n,t} = sd_{n,(t-1)} - rd_{n,t} - sd_los_{n,t} + r_{n,t} + id_{n,t} \quad (2.5)$$

$$r_{n,t} = -p_{n,t} + pr_{n,t} + h_{n,t,4} + sb_{n,t,1} \cdot h_{n,t,1} - sb_{n,t,2} \cdot h_{n,t,2} + sb_{n,t,3} \cdot h_{n,t,3} \quad (2.6)$$

Stanje gornje i donje akumulacije za n -ti dan i 24. sat uvijek je jednako nultom stanju gornje i donje akumulacije za sljedeći $(n+1)$ dan (2.7). Ovim ograničenjem se fokusiramo na dnevni režim rada spremišta.

$$s_{(n+1),0} = s_{n,24}, \quad sd_{(n+1),0} = sd_{n,24} \quad (2.7)$$

Varijabla $h_{n,t,4}$, koja predstavlja proizvodnju energije za prodaju na tržištu, ima dodatno ograničenje na vrijednost. Naime, vrijednost navedene varijable može biti 0 kada spremište ne radi u režimu pražnjenja ili između tehničkog minimuma zadanog konstantom $kdss$ i instalirane snage koja se zadaje kao gornja granica na varijablu $h_{n,t,4}$. Kako bi se omogućila ovakva definicija varijable $h_{n,t,4}$ u MILP tehnici optimiranja, dodana su ograničenja dana izrazima (2.8), (2.9) i (2.10) te uvedeni indikatori $hh_{n,t,4}$ i $k_{n,t,4}$ (cjelobrojne varijable s granicama 0-1000, odnosno 0-1) i realna varijabla $u_{n,t,4}$ (s granicama 0- $kdss$).

$$hh_{n,t,4} \cdot kdss + u_{n,t,4} = h_{n,t,4} \quad (2.8)$$

$$hh_{n,t,4} + k_{n,t,4} \geq 1 \quad (2.9)$$

$$k_{n,t,4} + u_{n,t,4} \leq 1 \quad (2.10)$$

Ovakva ograničenja nisu potrebna za varijable $h_{n,t,1}$ do $h_{n,t,3}$ jer se ograničenjima (2.23-2.25) onemogućava pružanje pomoćnih usluga bez istovremene proizvodnje $h_{n,t,4}$. U nastavku je dan primjer za navedena ograničenja (2.8-2.10). Kad je proizvodnja spremišta 0 ($h_{n,t,4}=0$) tada je $hh_{n,t,4}=0$ i $k_{n,t,4}=1$ i $u_{n,t,4}=0$, a ako je proizvodnja jednaka tehničkom minimumu, tada je $hh_{n,t,4}=1$, $k_{n,t,4}=0$ i $u_{n,t,4}=0$. Kod proizvodnje veće od tehničkog minimuma a različite od višekratnika tehničkog minimuma, $k_{n,t,4}$ je uvijek jednak 0, indikator $hh_{n,t,4}$ je cjelobrojni kvocijent $h_{n,t,4}/kdss$, a $u_{n,t,4}$ ostatak.

Ograničenja (2.11-2.16), postavljaju odgovarajuće indikatore na vrijednost 1 kad spremište obavlja radnje poput: punjenja (2.11), proizvodnje energije (2.12), usluge regulacije prema gore (2.13) i dolje (2.14), havarijske rezerve (2.15) i preljeva energije (2.16). Ako je neka od navedenih radnji aktivna, odgovarajući indikatori $t_{p_{n,t}}$, $t_{h_{n,t,4}}$, $t_{h_{n,t,1}}$, $t_{h_{n,t,2}}$, $t_{h_{n,t,3}}$, $t_{pr_{n,t}}$ (cjelobrojni tip, 0 ili 1) postižu vrijednost 1, dok će za neaktivno stanje njihova vrijednost biti 0.

$$-p^u + 10^{-3} \leq p_{n,t} - t_{p_{n,t}} \cdot p^u \leq 0 \quad (2.11)$$

$$-h_4^u + 10^{-3} \leq h_{n,t,4} - t_{h_{n,t,4}} \cdot h_4^u \leq 0 \quad (2.12)$$

$$-h_1^u + 10^{-3} \leq h_{n,t,1} - t_{h_{n,t,1}} \cdot h_1^u \leq 0 \quad (2.13)$$

$$-h_2^u + 10^{-3} \leq h_{n,t,2} - t_{h_{n,t,2}} \cdot h_2^u \leq 0 \quad (2.14)$$

$$-h_3^u + 10^{-3} \leq h_{n,t,3} - t_{h_{n,t,3}} \cdot h_3^u \leq 0 \quad (2.15)$$

$$-pr^u + 10^{-3} \leq pr_{n,t} - t_{pr_{n,t}} \cdot pr^u \leq 0 \quad (2.16)$$

U predloženom modelu, spremištu je onemogućeno istovremeno punjenje i pražnjenje za uslugu arbitraže (2.17) te istovremena radnja punjenja i preljeva energije (2.18).

$$t_{h_{n,t,4}} + t_{p_{n,t}} \leq 1 \quad (2.17)$$

$$t_{pr_{n,t}} + t_{p_{n,t}} \leq 1 \quad (2.18)$$

Ograničenje (2.19) određuje da je suma snaga svih usluga u proizvodnji manja ili jednaka ukupnoj snazi spremišta h (zadana ulazna vrijednost). Budući da je u modelu omogućen plasman energije na tržište pomoćnih usluga u načinu rada punjenja, definirano je da suma snage regulacije prema dolje i snage punjenja mora biti manja ili jednaka maksimalnoj snazi punjenja spremišta p^u (zadana maksimalna vrijednost varijable p) (2.20). Nadalje, ako spremište obavlja regulaciju prema gore u načinu rada punjenja, tada se spremište mora puniti minimalno tom snagom koja se nudi kao regulacija prema gore (2.21). Ako spremište obavlja uslugu regulacije prema dolje u načinu rada proizvodnje tada spremište mora proizvoditi minimalno snagom koja je jednaka zbroju tehničkog minimuma i snage koja se nudi (2.22). Određivanje minimalne snage punjenja uz istovremeno obavljanje regulacije prema gore i proizvodnje uz istovremeno obavljanje regulacije prema dolje predstavljeno je ograničenjima (2.21) i (2.22).

$$h_{n,t,1} + h_{n,t,3} + h_{n,t,4} \leq h \quad (2.19)$$

$$h_{n,t,2} + p_{n,t} \leq p^u \quad (2.20)$$

$$sb_{n,t,1} \cdot h_{n,t,1} - p_{n,t} \leq h_1^u \cdot t - h_{n,t,4} \quad (2.21)$$

$$sb_{n,t,2} \cdot h_{n,t,2} - h_{n,t,4} \leq h_2^u \cdot t - p_{n,t} - kdss \cdot t - h_{n,t,4} \quad (2.22)$$

Pomoću ograničenja (2.23), (2.24) i (2.25) se uvjetuje da spremište mora biti u pogonu (proizvodnja ili punjenje) ako želi obavljati usluge regulacije prema gore (2.23) ili dolje (2.24) te da mora bit u proizvodnom pogonu ako želi obavljati havarijsku rezervu (2.25).

$$t - h_{n,t,4} + t - p_{n,t} - t - h_{n,t,2} \geq 0 \quad (2.23)$$

$$t - h_{n,t,4} + t - p_{n,t} - t - h_{n,t,1} \geq 0 \quad (2.24)$$

$$t - h_{n,t,4} - t - h_{n,t,3} \geq 0 \quad (2.25)$$

Troškovi spremišta definirani su ograničenjima (2.26 – 2.32).

$$t - h_{n,t,4} + t - p_{n,t} = t_{n,t}^r \quad (2.26)$$

$$\begin{aligned} & \eta \cdot sb_{n,t,1} \cdot ek_1 \cdot h_{n,t,1} - \eta \cdot sb_{n,t,2} \cdot ek_2 \cdot h_{n,t,2} + \\ & \eta \cdot sb_{n,t,3} \cdot ek_3 \cdot h_{n,t,3} + \eta \cdot ek_4 \cdot h_{n,t,4} + ekp \cdot p_{n,t} = E_{n,t} \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$t_{n,t}^r - t_{n,(t-1)}^r = t_{n,t}^{s-u} - t_{n,t}^{s-d} \quad (2.28)$$

$$t - p_{n,(t-1)} + t - h_{n,t,4} - t_{n,t}^{c-d} \leq 1 \quad (2.29)$$

$$t - h_{n,(t-1),4} + t - p_{n,t} - t_{n,t}^{d-c} \leq 1 \quad (2.30)$$

$$t_{n,t}^{d-c} + t_{n,t}^{c-d} + t_{n,t}^{s-u} = t_{n,t}^{su} \quad (2.31)$$

$$t_{n,t}^{d-c} + t_{n,t}^{c-d} + t_{n,t}^{s-d} = t_{n,t}^{sd} \quad (2.32)$$

Za računanje troška rada spremišta potrebno je postaviti indikator koji će odrediti kada spremište radi. Ograničenje (2.26) postavlja indikator rada spremišta $t_{n,t}^r$ na 0 kad spremište nije u pogonu, odnosno 1 kad je spremište u pogonu. Za potrebu računanja troška ovisnog o proizvedenoj energiji spremišta potrebno je računati ukupnu satnu proizvedenu energiju

spremišta. Ograničenje (2.27) računa ukupnu satnu proizvedenu energiju spremišta. Za izračun troška pokretanja i zaustavljanja, potrebno je postaviti indikatore koji će odrediti kad dolazi do pokretanja odnosno zaustavljanja spremišta. Ograničenje (2.28) računa indikatore za pokretanje i zaustavljanje spremišta ($t_{n,t}^{s-u}$, $t_{n,t}^{s-d}$) s obzirom na rad spremišta ($t_{n,t}^r$), dok ograničenja (2.29) i (2.30) računaju slučajeve pokretanja i zaustavljanja spremišta kad dolazi do promjene u radu spremišta iz punjenja u režim proizvodnje i obrnuto. Ukupni indikatori za pokretanje ($t_{n,t}^{s-u}$) i zaustavljanje ($t_{n,t}^{s-d}$) dani su ograničenjima (2.31) i (2.32).

Spremište energije ima dodatna ograničenja za gornju i donju akumulaciju energije koja onemogućava gornjoj akumulaciji da se isprazni u kratkom vremenu. Budući da je optimizacija modela dnevna, algoritam bi kao dnevno optimalno rješenje odabirao režim rada sa što većom proizvodnjom energije (velikim ispustima iz gornje akumulacije) što bi, bez definiranja dodatnog ograničenja za gornju akumulaciju spremišta, dovelo do brzog pražnjenja gornje akumulacije (cca. za nekoliko dana). Dodatno ograničenje na gornju akumulaciju spremišta definirano je koeficijentom k_{spr_gn} koji je jednak umnošku koeficijenta cijena (k_{cijene_n}) i koeficijenta dotoka energije (k_{pritok_gn}) za gornju akumulaciju (2.33), dok je dodatno ograničenje donje akumulacije (2.34) definirano koeficijentom k_{spr_dn} koji je obrnuto proporcionalan koeficijentu k_{spr_gn} , odnosno vrijedi:

$$k_{spr_gn} = k_{cijene_n} \cdot k_{pritok_gn} \quad (2.33)$$

$$k_{spr_dn} = 1 / k_{spr_gn} \quad (2.34)$$

Za spremišta energije koja nemaju dotok energije u gornju akumulaciju potrebno je koeficijent dotoka energije postaviti na 1, odnosno $k_{pritok_gn}=1$, dok se za spremišta koja nemaju donju akumulaciju, k_{spr_dn} postavi na vrijednost 1.

Koeficijent k_{cijene_n} se određuje na način da se promatra medijan današnjih i sutrašnjih cijena. Ako su oba medijana pozitivna, k_{cijene_n} se odredi da se medijan sutrašnjih cijena podijeli medijanom današnjih cijena. Ako je medijan današnjih cijena pozitivan, a medijan sutrašnjih cijena negativan, tada se danas treba prazniti akumulacija, a sutra puniti (zbog negativnih cijena). Međutim, u ovom slučaju još se promatra omjer medijana te ovisno o njegovom iznosu određuje se koeficijent k_{cijene_n} , odnosno određuje se hoće li se akumulacija više ili manje prazniti. Ako je medijan današnjih cijena negativan, a medijan sutrašnjih cijena pozitivan, u tom slučaju se danas treba puniti akumulacija, a sutra prazniti. Međutim, uspoređuje se omjer apsolutnih vrijednosti medijana te ako je medijan današnjih cijena veći od medijana

sutrašnjih cijena, k_{cijene_n} jednak je apsolutnoj vrijednosti medijana današnji/sutrašnji. U suprotnom k_{cijene_n} jednak je apsolutnoj vrijednosti medijana sutrašnji/današnji. Ako su oba medijana negativna, također se uspoređuje omjer apsolutnih vrijednosti medijana. U slučaju da je apsolutna vrijednost medijana današnjih cijena veća od apsolutne vrijednosti medijana sutrašnjih cijena, k_{cijene_n} jednak je apsolutnoj vrijednosti medijana današnji/sutrašnji. U suprotnom, k_{cijene_n} jednak je apsolutnoj vrijednosti medijana sutrašnji/današnji.

Koeficijent $k_{pritok_g_n}$ se određuje omjerom sutrašnjeg i današnjeg dotoka (2.35).

$$k_{pritok_g_n} = i_{(n+1)} / i_n \quad (2.35)$$

Stanje gornje i donje akumulacije u svakom danu za 24. sat fiksno se zadaje te je ono jednako umnošku stanja gornje i donje akumulacije u nultom satu i koeficijenata $k_{spr_g_n}$ odnosno $k_{spr_d_n}$ (2.36) i (2.37).

$$s_{n,24} = k_{spr_g_n} \cdot s_{n,0} \quad (2.36)$$

$$sd_{n,24} = k_{spr_d_n} \cdot sd_{n,0} \quad (2.37)$$

Budući da se umnoškom koeficijenta $k_{spr_g_n}$ i stanja gornje akumulacije u nultom satu ($s_{n,0}$) (2.36) može definirati stanje akumulacije u 24. satu koje je višestruko manje ili veće od stanja u nultom satu, to može dovesti do situacije da spremište ne može ispoštovati taj uvjet, odnosno da ne može napuniti ili isprazniti gornju akumulaciju u tolikoj mjeri. Stoga je potrebno uvesti gornju ($k_{spr_g_gornja}$) i donju ($k_{spr_g_donja}$) granicu koeficijenta k_{spr_g} . Gornja i donja granica koeficijenta k_{spr_g} štite spremište od prekomjernog punjenja i pražnjenja.

Dakle, uzimajući u obzir sve gornje izraze, pogon spremišta energije je definiran sljedećim konstantama:

- koeficijentom učinkovitosti spremišta (η)
- dotokom energije u gornju akumulaciju (i)
- gornjom i donjom granicom stanja gornje akumulacije (s^u, s^d)
- gubicima gornje akumulacije (s_{los})
- maksimalnom snagom spremišta (h)
- maksimalnim snagama različitih usluga koje spremište nudi ($h_z^u, z=1, \dots, 4$)
- tehničkim minimumom agregata (kds)
- koeficijentima (v_1, v_2 i v_3), odnosno sumom slučajnih brojeva koji određuju vjerojatnost da će spremište u nekom satu bit angažirano u određenoj pomoćnoj usluzi

- maksimalnom snagom punjenja (p'')
- maksimalnom veličinom preljeva spremišta (pr'')
- dotokom energije u donju akumulaciju (id)
- gornjom i donjom granicom stanja donje akumulacije (sd'' , sd')
- gubicima donje akumulacije (sd_{los})
- maksimalnim i minimalnim ispuštom iz donje akumulacije (biološki minimum, rd'' , rd')
- cijenom fiksnog troška spremišta (k_1)
- cijenom troška ovisnog o radu spremišta (k_2), o trenutnoj proizvodnji spremišta (k_3), o pokretanju (k_4) i zaustavljanju spremišta (k_5)
- energetske koeficijentima spremišta (ek_1-ek_4 , ekp)
- dodatnim ograničenjima na akumulacije spremišta (gornja i donja granica koeficijenta k_{spr_g}).

2.2.2. Ograničenja na tokove energija ostalih proizvodnih jedinica u sustavu

Dodavanjem modela rada ostalih proizvodnih jedinica omogućava se simuliranje rada spremišta energije u realnom EES-u sa nizom konkurentnih proizvođača.

Kako je već prethodno istaknuto, u predloženom modelu za optimizaciju rada spremišta energije u tržišno orijentiranom EES-u, pogon i troškovi rada spremišta su modelirani detaljno, dok je proizvodnja ostalih proizvodnih postrojenja u sustavu (parne, plinske i kogeneracijske TE, protočne i akumulacijske HE, FNE i VE) modelirana jednostavnije, tj. s jednim proizvodnim postrojenjem svakog tipa s više jediničnih agregata. Taj jedinični agregat je s aspekta troškova pogona prilično detaljno modeliran (uzima se u obzir specifični trošak pogona agregata toga tipa, trošak pokretanja agregata toga tipa, jedinična snaga agregata, tehnički minimum agregata itd.). Optimalni broj agregata svakog tipa proizvodnih jedinica određuje se optimizacijskim postupkom. Detaljan opis modeliranja svakog od tipova ostalih proizvodnih jedinica u sustavu dan je u nastavku.

Takav pristup je odabran jer:

- pojedinačno modeliranje svih proizvodnih postrojenja u sustavu stvorilo bi preglomazan model sa nizom varijabli i složenom funkcijom cilja, naročito u većem sustavu sa većim brojem agregata svakog tipa, što pak postavlja puno veće zahtjeve na računalo na kojem se izvodi proračun. Također, takav model ne bi bio univerzalan već prilagođen jednom sustavu

- greška koja se unosi zbirnim modeliranjem agregata pojedinog tipa je puno manja od greške uzrokovane nepoznavanjem nekih veličina izuzetno važnih za modeliranje rada ostalih proizvodnih postrojenja (količine i raspored oborina, intezitet vjetra, cijene pojedinih energenata itd.).

Ovakva aproksimacija svih proizvodnih postrojenja istog tipa jednim postrojenjem koje ima više istih agregata, s prosječnim troškovima pogona i prosječnim troškovima pokretanja svakog agregata, čini se kao razuman kompromis za navedene ciljeve.

Ograničenja na tokove energija termoelektrana

Broj novopokrenutih agregata u jednom satu parne, plinske i kogeneracijske TE ($k_{terpa_{n,t}}$, $k_{terpl_{n,t}}$, $k_{tertop_{n,t}}$), potreban za računanje troškova u funkciji cilja, se računa kao razlika potrebnog broja agregata u tom i prethodnom satu, što je dano izrazima (2.41-2.43). Potreban broj agregata navedenih termoelektrana u svakom satu (cjelobrojne varijable $akt_{agr_{terpa_{n,t}}}$, $akt_{agr_{terpl_{n,t}}}$, $akt_{agr_{tertop_{n,t}}}$) se računaju izrazima (2.38-2.40) gdje se podijeli angažirana snaga određenog tipa elektrane u svakom satu ($terpa_{n,t}$, $terpl_{n,t}$ i $tertop_{n,t}$) sa snagom tipskog agregata ($terpa_{snagalagr}$, $terpl_{snagalagr}$, $tertop_{snagalagr}$) i uzme u obzir ostatak ($z_{terpa_{n,t}}$, $z_{terpl_{n,t}}$, $z_{tertop_{n,t}}$) koji je realna varijabla s vrijednostima danim izrazima (2.44-2.46):

$$\frac{terpa_{n,t}}{terpa_{snagalagr}} + z_{terpa_{n,t}} = akt_{agr_{terpa_{n,t}}} \quad (2.38)$$

$$\frac{terpl_{n,t}}{terpl_{snagalagr}} + z_{terpl_{n,t}} = akt_{agr_{terpl_{n,t}}} \quad (2.39)$$

$$\frac{tertop_{n,t}}{tertop_{snagalagr}} + z_{tertop_{n,t}} = akt_{agr_{tertop_{n,t}}} \quad (2.40)$$

$$akt_{agr_{terpa_{n,t}}} - akt_{agr_{terpa_{n,(t-1)}}} \leq k_{terpa_{n,t}} \quad (2.41)$$

$$akt_{agr_{terpl_{n,t}}} - akt_{agr_{terpl_{n,(t-1)}}} \leq k_{terpl_{n,t}} \quad (2.42)$$

$$akt_{agr_{tertop_{n,t}}} - akt_{agr_{tertop_{n,(t-1)}}} \leq k_{tertop_{n,t}} \quad (2.43)$$

$$0 \leq z_{terpa_{n,t}} \leq 1 - terpa_{teh_min} / (100MW) \quad (2.44)$$

$$0 \leq z_{_terpl_{n,t}} \leq 1 - terpl_teh_min / (100MW) \quad (2.45)$$

$$0 \leq z_{_tertop_{n,t}} \leq 1 - terptop_teh_min / (100MW) \quad (2.46)$$

Dakle, za termoelektrane se unose sljedeće konstante:

- specifični trošak rada pojedinog tipa TE ($c_{terpa}, c_{terpl}, c_{tertop}$)
- trošak pokretanja agregata pojedinog tipa TE ($c_{terpa}^{su}, c_{terpl}^{su}, c_{tertop}^{su}$)
- minimalna i maksimalna moguća proizvodnja TE (minimalna i maksimalna vrijednost varijabli $terpa_{n,t}, terpl_{n,t}$ i $tertop_{n,t}$)
- snaga jednog agregata TE ($terpa_snagaIagr, terpl_snagaIagr, terptop_snagaIagr$)
- tehnički minimum agregata TE ($terpa_teh_min, terpl_teh_min, terptop_teh_min$).

Ograničenja na tokove energija protočne HE

Energija koju protočna HE može proizvesti u jednom satu ($prot_{n,t} \cdot ek_5$) direktno je ovisna o zadanom dotoku u svakom satu $i_prot_{n,t}$, što je dano sljedećim ograničenjem:

$$prot_{n,t} \leq i_prot_{n,t} \quad (2.47)$$

Broj novopokrenutih agregata u jednom satu protočne HE ($k_prot_{n,t}$) potreban za računanje troškova u funkciji cilja se računa na analogan način kao i kod termoelektrana, što je dano izrazima (2.48) i (2.49).

$$\frac{prot_{n,t}}{prot_snagaIagr} + z_{_prot_{n,t}} = akt_agr_prot_{n,t} \quad (2.48)$$

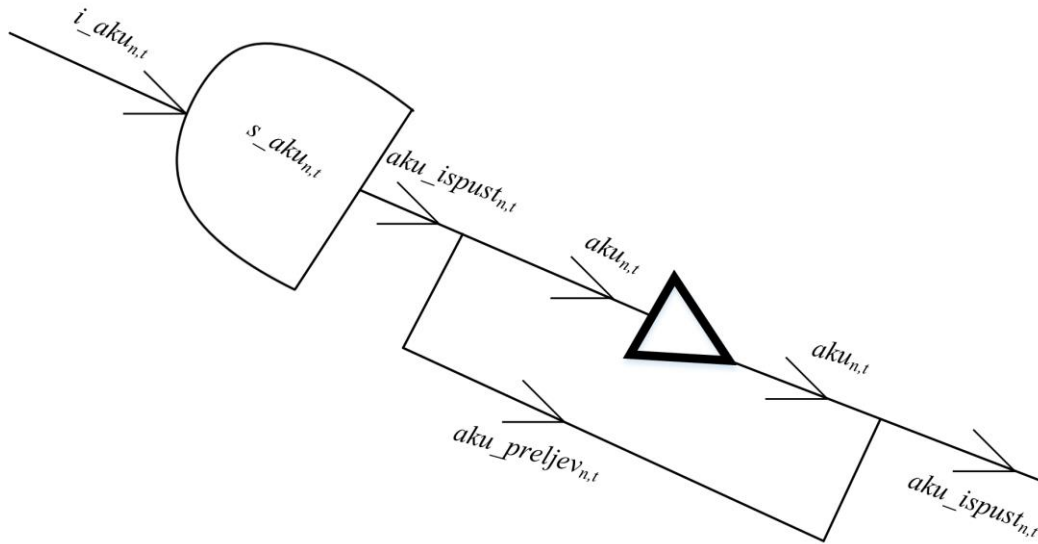
$$akt_agr_prot_{n,t} - akt_agr_prot_{n,(t-1)} \leq k_prot_{n,t} \quad (2.49)$$

Naime, kod protočne HE se unose sljedeće konstante:

- specifični trošak rada (c_{prot})
- trošak pokretanja agregata (c_{prot}^{su})
- minimalna i maksimalna vrijednost varijable $prot_{n,t}$
- snaga jednog agregata ($prot_snagaIagr$)
- tehnički minimum agregata ($prot_teh_min$)
- energetska koeficijent (ek_5)
- dotok protočne HE ($i_prot_{n,t}$).

Ograničenja na tokove energija akumulacijske HE

Za akumulacijsku HE, prikazanu shemom na slici 2.2, potrebno je zadati neto dotoke (bruto dotoci umanjani za gubitke isparavanja i procjeđivanja) za svaki sat ($i_{aku,n,t}$), dok se količina vode u akumulaciji ($s_{aku,n,t}$), ispust iz akumulacije ($aku_ispust_{n,t}$), protok kroz turbine ($aku_{n,t}$) i preljev ($aku_preljev_{n,t}$) za svaki sat određuju optimizacijskim postupkom. Sve navedene veličine se izražavaju u m^3 .



Slika 2.2 Shema akumulacijske HE

Satna energija akumulacijske HE dobije se umnoškom varijable $aku_{n,t}$ s energetske koeficijentom ek_6 , što je već rečeno u opisu funkcije cilja. Izraz (2.50) određuje balans vode za akumulaciju, odnosno ograničenje s obzirom na volumen bazena akumulacijske HE, dok izraz (2.51) definira ispust akumulacijske HE. Stanje bazena u 24. satu uvijek je fiksno definirano te je ono jednako stanju bazena u nultom satu sljedećeg dana (2.52):

$$s_{aku,n,t} = s_{aku,n,(t-1)} - aku_ispust_{n,t} + i_{aku,n,t} \quad (2.50)$$

$$aku_ispust_{n,t} = aku_{n,t} + aku_preljev_{n,t} \quad (2.51)$$

$$s_{aku,(n+1),0} = s_{aku,n,24} \quad (2.52)$$

Broj novopokrenutih agregata u jednom satu akumulacijske HE ($k_{aku,n,t}$) potreban za računanje troškova u funkciji cilja se računa na analogan način kao i kod protočne HE, što je dano izrazima (2.53) i (2.54).

$$\frac{aku_{n,t}}{aku_snagaIagr} + z_aku_{n,t} = akt_agr_aku_{n,t} \quad (2.53)$$

$$akt_agr_aku_{n,t} - akt_agr_aku_{n,(t-1)} \leq k_aku_{n,t} \quad (2.54)$$

Budući da je optimizacija modela dnevna, bez definiranja i korištenja dodatnog ograničenja na bazen akumulacijske HE i u ovom slučaju bi, kao u slučaju spremišta, došlo do brzog pražnjenja bazena. Naime, dodatno ograničenje bazena akumulacijske HE definirano je koeficijentom $k_bazen_aku_n$ koji ovisi samo o dotoku (i_aku_n) u bazen. Koeficijent $k_bazen_aku_n$ definiran je kao:

$$k_bazen_aku_n = i_aku_{(n+1)} / i_aku_n \quad (2.55)$$

Koeficijent $k_bazen_aku_n$ ima svoju gornju ($k_bazen_aku_gornja$) i donju ($k_bazen_aku_donja$) granicu, slično kao kod gornje akumulacije spremišta, koje onemogućuju prekomjerno punjenje i pražnjenje bazena. Stanje bazena za 24. određuje se kao umnožak nultog stanja za taj dan i koeficijenta $k_bazen_aku_n$, odnosno:

$$s_aku_{n,24} = s_aku_{n,0} \cdot k_bazen_aku_n \quad (2.56)$$

Dakle, kod akumulacijske HE se unose sljedeće konstante:

- specifični trošak rada (c_{aku})
- trošak pokretanja agregata (c_{aku}^{su})
- minimalna i maksimalna vrijednost varijable $aku_{n,t}$
- snaga jednog agregata ($aku_snagaIagr$)
- tehnički minimum agregata (aku_teh_min)
- energetska koeficijent (ek_6)
- dotok akumulacijske HE ($i_aku_{n,t}$)
- dodatna ograničenja na akumulaciju (gornja i donja granica koeficijenta k_bazen_aku).

Ograničenja na tokove energija IOIE

Satna energija FNE i VE dana je varijablama $fne_{n,t}$ i $ve_{n,t}$. Donja granica tih varijabli je vrijednost 0, a gornja granica je učitana vrijednost energije proizvodnje navedenih izvora. Naime, gornja granica je za svaki sat različita i jednaka je vrijednostima učitane proizvodnje (konstante) FNE i VE u tom satu. Algoritam bira optimalnu proizvodnju navedenih elektrana

između vrijednosti 0 i vrijednosti učitane energije. Naime, učitani podaci mogu biti slučajno generirani, generirani po odabranoj razdiobi, može biti korišten određeni scenarij iz prethodnih godina, itd. Modeliranje rada FNE i VE ne uzima u obzir specifične troškove rada ni troškove pokretanja agregata kao kod gore spomenutih postrojenja. Dakle u slučaju IOIE, učitavaju se sljedeće konstante:

- gornja granica varijable $fne_{n,t}$
- gornja granica varijable $ve_{n,t}$.

Proizvodne kompanije u svom portfelju mogu imati nekoliko proizvodnih postrojenja, a najčešće su to FNE i VE. Te kompanije u nekim slučajevima sklapaju ugovor s operatorom sustava o minimalnoj satnoj isporučenoj energiji te plaćaju penale ukoliko proizvode ispod ugovorene energije. Da bi smanjili iznos penala, jedno od rješenja za GENCO kompanije je ulaganje u tehnologiju spremišta. Izraz (2.57) omogućava izračun razlike energije proizvedene od GENCO-a i ugovorene energije (E_gran), dok se pomoću izraza (2.58) računa energija koja se naplaćuje kao penali. Oznake koje se koriste u izrazima (2.57) i (2.58) su:

$E_{n,t}^{raz}$ - razlika proizvedene energije GENCO-a i ugovorene energije (E_gran) ispod koje se plaćaju penali (MWh)

E_gran - ugovorena energija, te će GENCO, ako bude proizvodio ispod te energije, plaćati penale (MWh)

$E_{n,t}^{nap}$ - energija koja se naplaćuje, energija penala (MWh)

$$E_{n,t}^{raz} = E_{n,t} - 2 \cdot ekp \cdot p_{n,t} + fne_{n,t} + ve_{n,t} - E_gran \quad (2.57)$$

$$E_{n,t}^{raz} + E_{n,t}^{nap} \geq 0 \quad (2.58)$$

2.2.3. Ograničenja na plasman energije na tržištu pomoćnih usluga

Konstante $sb_{n,t,1}$, $sb_{n,t,2}$ i $sb_{n,t,3}$ sadrže slučajno generirane brojeve (po trokutastoj razdiobi) između 0 i 1 koji određuju vjerojatnost da će u zadanom satu spremište biti odabrano za obavljanje usluge regulacije prema gore i dolje te havarijske rezerve. Suma $sb_{n,t,1}$, $sb_{n,t,2}$ i $sb_{n,t,3}$ je unaprijed zadana konstantama v_1 , v_2 i v_3 , odnosno vrijedi:

$$8760 \cdot v_1 = \sum_n \sum_t^{365 \cdot 24} sb_{n,t,1} \quad (2.59)$$

$$8760 \cdot v_2 = \sum_n \sum_t^{365 \cdot 24} sb_{n,t,2} \quad (2.60)$$

$$8760 \cdot v_3 = \sum_n \sum_t^{365 \cdot 24} sb_{n,t,3} \quad (2.61)$$

Algoritam najprije odredi vektor $sb_{n,t,1}$, a nakon toga računa vektor $sb_{n,t,2}$ na sljedeći način:

$$sb_{n,t,2} = 1 - sb_{n,t,1} - slb_{n,t} \quad (2.62)$$

Koeficijent $slb_{n,t}$ je zadan kao umnožak slučajno generiranog broja između 0 i 1 te broja koji je jednak $(1-sb_{n,t,1})$. Na kraju se zadaje niz $sb_{n,t,3}$ također po trokutastoj razdiobi. Kad se jednom izračunaju vrijednosti vektora $sb_{n,t,1}$, $sb_{n,t,2}$ i $sb_{n,t,3}$, one se fiksiraju te su iste za svaku simulaciju (ne mijenjaju se pri računanju nove simulacije).

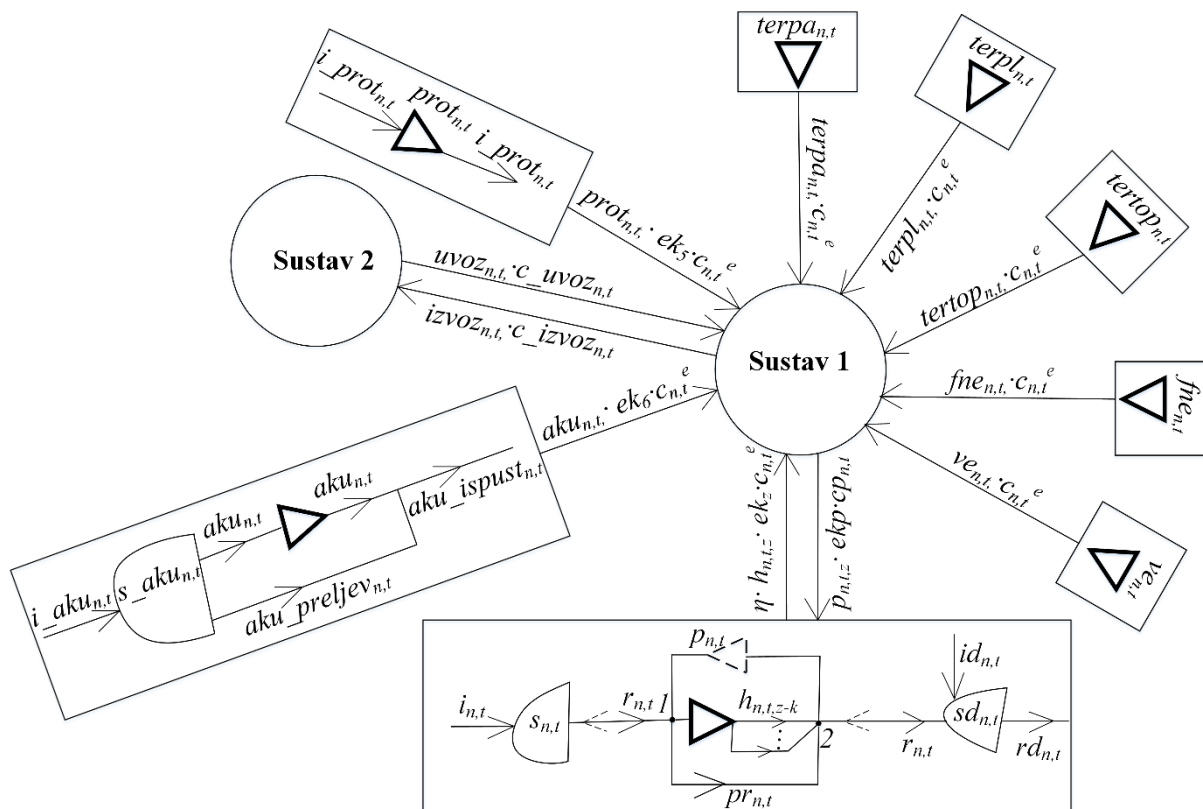
2.2.4. Ograničenja na tokove energija cjelokupnog sustava

Slika 2.3 prikazuje cjelokupni modelirani sustav s tokovima energija. Svi sudionici na tržištu, zajedno s energijom uvoza i izvoza, moraju zadovoljiti dnevno ukupno opterećenje EES-a (2.63), dok izraz (2.64) uvjetuje da izvoz u svakom satu mora biti manji ili jednak zbroju ukupne proizvodnje svih postrojenja i uvoza:

$$\begin{aligned} & \eta \cdot sb_{n,t,1} \cdot h_{n,t,1} \cdot ek_1 - \eta \cdot sb_{n,t,2} \cdot h_{n,t,2} \cdot ek_2 + \eta \cdot sb_{n,t,3} \cdot h_{n,t,3} \cdot ek_3 + \\ & \eta \cdot h_{n,t,4} \cdot ek_4 + terpa_{n,t} + terpl_{n,t} + tertop_{n,t} + prot_{n,t} \cdot ek_5 + aku_{n,t} \cdot ek_6 + \quad (2.63) \\ & fne_{n,t} + ve_{n,t} - p_{n,t} \cdot ekp + uvoz_{n,t} - izvoz_{n,t} = snaga - dan_{n,t} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & izvoz_{n,t} \leq \eta \cdot sb_{n,t,1} \cdot h_{n,t,1} \cdot ek_1 - \eta \cdot sb_{n,t,2} \cdot h_{n,t,2} \cdot ek_2 + \\ & \eta \cdot sb_{n,t,3} \cdot h_{n,t,3} \cdot ek_3 + \eta \cdot h_{n,t,4} \cdot ek_4 + terpa_{n,t} + terpl_{n,t} + \quad (2.64) \\ & tertop_{n,t} + prot_{n,t} \cdot ek_5 + aku_{n,t} \cdot ek_6 + fne_{n,t} + ve_{n,t} + uvoz_{n,t} \end{aligned}$$

Slika 2.3 zajedno s funkcijom cilja (2.3) predstavlja najobuhvatniji model sustava jer se u funkciji cilja i u ograničenjima uzima u obzir i spremište i ostala proizvodna postrojenja. Takav model je od interesa operatoru sustava. Optimizacija samog spremišta ili spremišta i još nekog proizvodnog postrojenja (od interesa GENCO kompanijama) se radi tako da se u funkciji cilja uzmu u obzir samo varijable i konstante spremišta, odnosno spremišta i promatranog proizvodnog postrojenja.



Slika 2.3 Cjelokupni modelirani sustav

2.3. Nomenklatura korištena u modelu

U ovom poglavlju još jednom su abecednim redom navedene sve oznake korištene u modelu. Nomenklatura je podijeljena s obzirom na varijable odluke i konstante. Varijable odluke su podijeljene s obzirom na tip varijabli, tj. realne i cjelobrojne.

Varijable odluke

Realne varijable odluke

- aku_ispust ispust iz akumulacijske hidroelektrane (10^6 m^3)
- $aku_preljev_{n,t}$ preljev iz akumulacije akumulacijske HE (10^6 m^3)
- $aku_{n,t}$ proizvodnja iz akumulacijske HE (10^6 m^3)
- $E_{n,t}$ ukupno proizvedena energija spremišta u n -tom danu i t -om satu (MWh)
- $E_{n,t}^{nap}$ energija koja se naplaćuje ako GENCO proizvodi ispod ugovorene energije (MWh)
- $E_{n,t}^{raz}$ razlika proizvedene energije GENCO-a i ugovorene energije (MWh)
- $h_{n,t,z}$ ispust iz gornje akumulacije spremišta koji sudjeluje u uslugama z u n -tom danu i t -om satu (10^6 m^3 , MWh)

$izvoz_{n,t}$	energija koja se izvozi (MWh)
$p_{n,t}$	energija kojom se puni spremište, odnosno energija koja je premještena iz donje u gornju akumulaciju spremišta u n -tom danu i t -om satu (10^6 m^3 , MWh)
$pr_{n,t}$	preljev energije iz gornje akumulacije spremišta u n -tom danu i t -om satu (10^6 m^3 , MWh)
$prot_{n,t}$	proizvodnja iz protočnih HE (10^6 m^3)
$rd_{n,t}$	ispust iz donje akumulacije spremišta u n -tom danu i t -om satu (10^6 m^3 , MWh)
$r_{n,t}$	ispust iz gornje akumulacije spremišta u n -tom danu i t -om satu (10^6 m^3 , MWh)
$s_aku_{n,t}$	volumen akumulacije akumulacijske HE (10^6 m^3)
$sd_{n,t}$	stanje energije u donjoj akumulaciji spremišta u n -tom danu i t -om satu (10^6 m^3 , MWh)
$s_{n,t}$	stanje energije u gornjoj akumulaciji spremišta u n -tom danu i t -om satu (10^6 m^3 , MWh)
$fne_{n,t}$	proizvodnja iz FNE (MWh)
$terpa_{n,t}$	proizvodnja iz parne TE (MWh)
$terpl_{n,t}$	proizvodnja iz plinske TE (MWh)
$tertop_{n,t}$	proizvodnja iz kogeneracijske TE (MWh)
$u_{n,t}$	varijabla koja sudjeluje u modeliranju tehničkog minimuma usluge $h_{n,t,4}$
$uvoz_{n,t}$	energija uvoza (MWh)
$ve_{n,t}$	proizvodnja iz VE (MWh)
$z_aku_{n,t}$	varijabla za zaokruživanje realne vrijednosti aktivnih agregata akumulacijske HE na cjelobrojnu veću vrijednost
$z_prot_{n,t}$	varijabla za zaokruživanje realne vrijednosti aktivnih agregata protočne HE na cjelobrojnu veću vrijednost
$z_terpa_{n,t}$	varijabla za zaokruživanje realne vrijednosti aktivnih agregata parne TE na cjelobrojnu veću vrijednost
$z_terpl_{n,t}$	varijabla za zaokruživanje realne vrijednosti aktivnih agregata plinske TE na cjelobrojnu veću vrijednost
$z_tertop_{n,t}$	varijabla za zaokruživanje realne vrijednosti aktivnih agregata kogeneracijske TE na cjelobrojnu veću vrijednost

Cjelobrojne varijable odluke

$akt_agr_aku_{n,t}$	broj aktivnih agregata u pojedinom satu u akumulacijskoj HE
$akt_agr_prot_{n,t}$	broj aktivnih agregata u pojedinom satu u protočnoj HE
$akt_agr_terpa_{n,t}$	broj aktivnih agregata u pojedinom satu u parnoj TE
$akt_agr_terpl_{n,t}$	broj aktivnih agregata u pojedinom satu u plinskoj TE
$akt_agr_tertop_{n,t}$	broj aktivnih agregata u pojedinom satu u kogeneracijskoj TE
$hh, k,$	varijable koje sudjeluju u modeliranju tehničkog minimuma usluge $h_{n,t,4}$

$k_{aku,n,t}$	broj novopokrenutih agregata u akumulacijskoj HE
$k_{prot,n,t}$	broj novopokrenutih agregata u protočnoj HE
$k_{terpa,n,t}$	broj novopokrenutih agregata u parnoj TE
$k_{terpl,n,t}$	broj novopokrenutih agregata u plinskoj TE
$k_{tertop,n,t}$	broj novopokrenutih agregata u kogeneracijskoj TE
$t_{h,n,t,z}$	indikator aktivnog stanja $h_{n,t,z}$
$t_{p,n,t}$	indikator aktivnog stanja punjenja
$t_{pr,n,t}$	indikator aktivnog stanja preljeva energije
$t_{n,t}^{c-d}$	indikator promjene načina rada spremišta (punjenje-proizvodnja)
$t_{n,t}^{d-c}$	indikator promjene načina rada spremišta (proizvodnja-punjenje)
$t_{n,t}^r$	indikator rada spremišta
$t_{n,t}^{sd}$	indikator zaustavljanja spremišta
$t_{n,t}^{su}$	indikator pokretanja agregata spremišta
$t_{n,t}^{s-u}$	indikator rada iz stanja mirovanja u pogonsko stanje

Konstante

A	matrica nejednakosti
A_{eq}	matrica jednakosti
b	vektor ekvivalentnosti nejednakosti
beq	vektor ekvivalentnosti jednakosti
$c_{izvoz,n,t}$	cijena izvoza energije (€/MWh)
c_{pen}	cijena po kojoj se naplaćuju penali (€/MWh)
$c_{uvoz,n,t}$	cijena uvoza energije (€/MWh)
c_{aku}	cijena specifičnog troška rada akumulacijske HE (€/MWh)
$c_{n,t,z}^e$	cijene energije na tržištu energije i pomoćnih usluga (€/MWh)
$c_{n,t,z}$	cijene rezervirane snage na tržištu pomoćnih usluga (€/MWh)
c_{prot}	cijena specifičnog troška rada protočne HE (€/MWh)
c_{aku}^{su}	cijena troška pokretanja agregata akumulacijske HE (€/pokretanju)
c_{prot}^{su}	cijena troška pokretanja agregata protočne HE (€/pokretanju)
c_{terpa}^{su}	cijena troška pokretanja agregata parne TE (€/pokretanju)
c_{terpl}^{su}	cijena troška pokretanja agregata plinske TE (€/pokretanju)
c_{tertop}^{su}	cijena troška pokretanja agregata kogeneracijske TE (€/pokretanju)
c_{terpa}	cijena specifičnog troška rada parne TE (€/MWh)

c_{terpl}	cijena specifičnog troška rada plinske TE (€/MWh)
c_{tertop}	cijena specifičnog troška rada kogeneracijske TE (€/MWh)
E_{gran}	ugovorena energija, GENCO će plaćati penale ukoliko bude proizvodio ispod iznosa ove energije
ek_5	energetski koeficijent protočne HE (MWh/($10^6 \cdot m^3$))
ek_6	energetski koeficijent akumulacijske HE (MWh/($10^6 \cdot m^3$))
ekp	energetski koeficijent punjenja spremišta (MWh/($10^6 \cdot m^3$), 1000)
ek_z	energetski koeficijent usluga spremišta (MWh/ m^3 , 1000)
$f(x)$	funkcija cilja u optimizacijskom postupku
h	ukupna snaga spremišta ($10^6 m^3$, MWh)
$i_{aku_{n,t}}$	dotok u akumulacijsku HE ($10^6 m^3$)
$i_{prot_{n,t}}$	dotok protočne HE ($10^6 m^3$)
$id_{n,t}$	dotok energije u donju akumulaciju spremišta ($10^6 m^3$, MWh)
$i_{n,t}$	dotok energije u gornju akumulaciju spremišta ($10^6 m^3$, MWh)
$intcon$	vektor varijabli cjelobrojnog tipa
$k_{bazen_aku_{n,t}}$	koeficijent akumulacije akumulacijske HE
$k_{bazen_aku_donja_{n,t}}$	donja granica koeficijenta $k_{bazen_aku_{n,t}}$
$k_{bazen_aku_gornja_{n,t}}$	gornja granica koeficijenta $k_{bazen_aku_{n,t}}$
$k_{spr_d_{n,t}}$	koeficijent donje akumulacije energije spremišta
$k_{spr_g_donja_{n,t}}$	donja granica koeficijenta $k_{spr_g_{n,t}}$
$k_{spr_g_gornja_{n,t}}$	gornja granica koeficijenta $k_{spr_g_{n,t}}$
$k_{spr_g_{n,t}}$	koeficijent gornje akumulacije energije spremišta
$k_{cijene_{n,t}}$	koeficijent cijena
$k_{pritok_g_{n,t}}$	koeficijent dotoka energije u gornju akumulaciju spremišta
k_1	fiksni trošak spremišta (€)
k_2	trošak rada (€)
k_3	trošak rada ovisan o proizvedenoj energiji (€/MWh)
k_4	trošak pokretanja agregata spremišta (€/pokretanju)
k_5	trošak zaustavljanja agregata spremišta (€/zaustavljanju)
$kdss$	koeficijent koji sudjeluje u računanju tehničkog minimuma spremišta u usluzi $h_{n,t,4}$
lb	vektor vrijednosti donjih granica varijabli odluka
n	broj dana
$s_{aku_{n,0}}$	stanje akumulacije akumulacijske HE u n -tom danu i nultom satu ($10^6 m^3$)
$s_{los_{n,t}}$	gubici gornje akumulacije spremišta ($10^6 m^3$, MWh)

$sb_{n,t,z}$	slučajno generirani broj, satna vjerojatnost da će spremište biti pozvano da sudjeluje u proizvodnji energije u pomoćnim uslugama
$sd_{n,0}$	stanje donje akumulacije spremišta u n -tom danu i nultom satu (m^3 , MWh)
$sd_{los_{n,t}}$	gubici donje akumulacije spremišta ($10^6 m^3$, MWh)
$slb_{n,t}$	slučajni broj, slučajno generirani broj korišten u određivanju $sb_{n,t,2}$
$s_{n,0}$	stanje gornje akumulacije spremišta u n -tom danu i nultom satu (m^3 , MWh)
$snaga_{dan_{n,t}}$	ukupno opterećenje EES-a u n -tom danu i t -om satu
t	sat
$terpa_{teh_min}$	tehnički minimum agregata parne TE
$terpl_{teh_min}$	tehnički minimum agregata plinske TE
$tertop_{teh_min}$	tehnički minimum agregata kogeneracijske TE
ub	vektor vrijednosti gornjih granica varijabli odluka
v_z	konstanta koja pomnožena s 8760 daje godišnju sumu satnih vjerojatnosti da će spremište energije biti pozvano da sudjeluje u proizvodnji energije za pomoćne usluge
η	koeficijent učinkovitosti (efikasnosti) spremišta

3. PRIMJENA MODELA ZA OPTIMIZACIJU RADA SPREMIŠTA ENERGIJE

Testiranje primjenjivosti modela obavljeno je na velikom broju proračuna optimalnog rada spremišta. Prikazani proračuni su podijeljeni u četiri grupe. U svim prikazanim proračunima polazilo se od tzv. osnovnog primjera radi kasnije usporedbe rezultata. U svim proračunima period promatranja je 1 godina.

U prvoj grupi proračuna simuliralo se samo spremište (bez modeliranja rada ostalih proizvodnih jedinica) te se promatrao utjecaj jednog parametra (koeficijenta učinkovitosti η) na očekivani rad spremišta (godišnja prodaja energije i snage na tržištu energije i tržištu pomoćnih usluga, sati rada pražnjenja u različite svrhe, punjenja i mirovanja, prihodi od različitih usluga, troškovi pogona itd.). Ovaj najjednostavniji slučaj je interesantan npr. investitorima koji žele investirati u spremište energije manjeg kapaciteta koje ne utječe bitno na politiku rada cjelokupnog EES-a. Model omogućava simulaciju različitih tehnologija spremanja i varijaciju niza parametara. Investitora ne zanima tko balansira potrošnju i proizvodnju u sustavu, doprinosi ostalih proizvodnih jedinica itd. već prvenstveno prihod koji može ostvariti kroz arbitražu na varijabilnosti cijena energije te prihod od pružanja pomoćnih usluga na otvorenom tržištu te usporedba s očekivanim pogonskim troškovima.

U drugoj grupi proračuna, koja može biti interesantna neovisnim proizvođačima energije koji u svom portfelju imaju intermitentne izvore (VE i/ili FNE) i prema ugovoru plaćaju penale za neisporučenu energiju, promatrao se utjecaj dodatnog spremišta na godišnje režime rada, prihode, rashode itd. GENCO poduzeća. Prvo je simuliran pogon bez spremišta i bez ikakvih penala, potom pogon bez spremišta ali s penalima zbog neisporučene ugovorene energije, a zatim sa spremištem različite snage i spomenutim penalima.

Sljedeća grupa proračuna razmatra utjecaj instalirane veličine spremišta na rad cjelokupnog sustava. Simulirane su različite ukupne instalirane veličine spremišta (proporcionalno se povećavao kapacitet samog spremišta, snage punjenja i pražnjenja, itd.) i promatran je njihov utjecaj na pogon ostalih proizvodnih jedinica u sustavu. Cilj ove grupe proračuna je određivanje optimalne veličine spremišta u sustavu.

Četvrta grupa proračuna razmatra utjecaj strukture EES-a na rad spremišta. Ispitivan je utjecaj povećanja udjela proizvodnje akumulacijskih hidroelektrana u sustavu na optimalni

režim rada spremišta energije te je posebno ispitan utjecaj povećanja udjela proizvodnje iz IOIE na rad spremišta. Simulacijama su obuhvaćeni svi tipovi proizvodnih jedinica. Proračun je interesantan i budućim investitorima/planerima i operatorima sustava.

3.1. Podaci korišteni u primjerima

Testiranje modela optimizacije rada spremišta u tržišnim uvjetima i kasnije ispitivanje utjecaja različitih veličina je provedeno na primjeru spremišta i EES-a, nazvanog osnovni primjer. U svim analizama se polazilo od tog osnovnog modela i kasnije se mijenjao obično jedan parametar, a ostali su bili fiksirani na početnim vrijednostima.

Pri modeliranju podataka o zbirnoj proizvodnji pojedinih tipova elektrana birani su podaci koji približno odgovaraju nekim zabilježenim podacima EES-a Republike Hrvatske [138]. Fiksne vrijednosti parametara, tj. vrijednosti koje su iste za svaki sat, su dane u tablicama, dok su promjenjive (koje se razlikuju iz sata u sat) prikazane grafički i posebno objašnjene.

Podaci spremišta

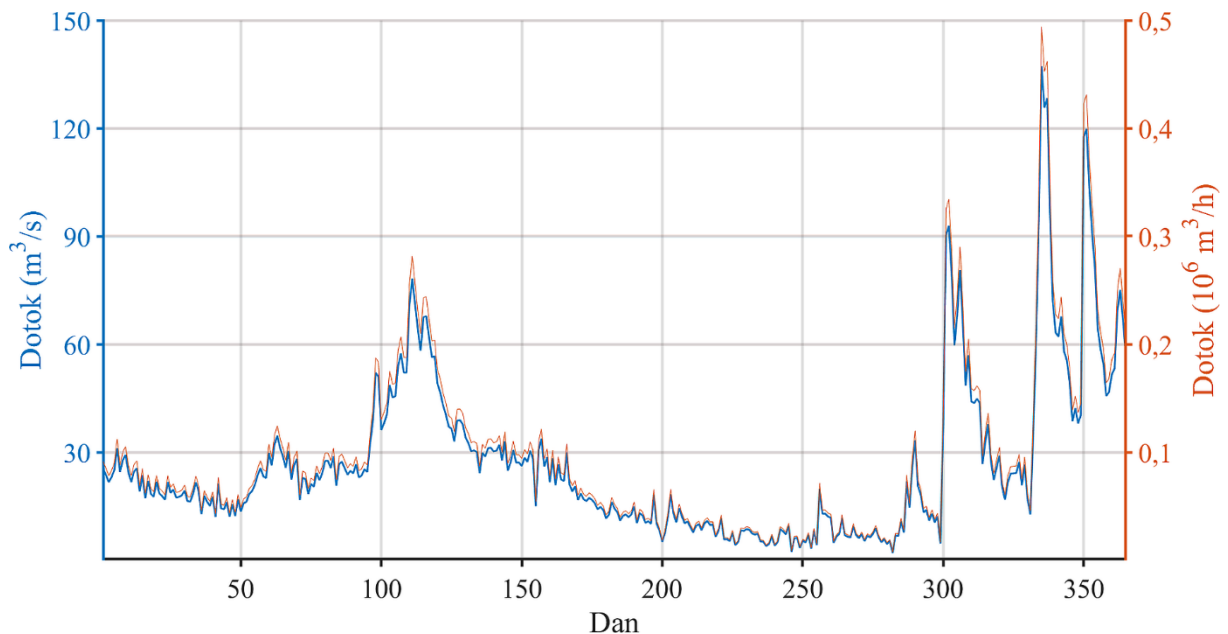
Tablica 3.1 prikazuje vrijednosti parametara spremišta tipa RHE (s asinkronom crpkom) i baterije za osnovni slučaj. Korištene su "prirodne" veličine, tj. 10^6m^3 za RHE i MWh za bateriju. Maksimalni iznos snaga pomoćnih usluga koje obavlja spremište ($h_{n,t,1}^u$, $h_{n,t,2}^u$ i $h_{n,t,3}^u$) je samo dio ukupno potrebne snage za ove usluge u sustavu. Troškovi prikazani u tablici se odnose na troškove pogona spremišta odabrane sukladno [56, 64, 68, 139-142].

Tablica 3.1 Vrijednosti parametara spremišta za osnovni slučaj

Parametri		RHE	Baterija
$s_{n,t}$	$s_{n,t}^u$	$6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	6.000 MWh
	$s_{n,t}^l$	$1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	1.000 MWh
$sd_{n,t}$	$sd_{n,t}^u$	$4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	4.000 MWh
	$sd_{n,t}^l$	$0,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	500 MWh
$s_{1,0}$		$4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	4.000 MWh
$sd_{1,0}$		$2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	2.000 MWh
s_{los}		0 m^3	0 MWh
sd_{los}		0 m^3	0 MWh
$h_{n,t,1}^u$		$0,04 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	0,04 MWh
$h_{n,t,2}^u$		$0,03 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	0,03 MWh
$h_{n,t,3}^u$		$0,02 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	0,02 MWh
$h_{n,t,4}^u$		$0,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	0,2 MWh
$p_{n,t}^u$		$0,1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	0,1 MWh
ek_1		$1000 \text{ MWh}/(10^6 \cdot \text{m}^3)$	1000

	ek_2	1000 MWh/($10^6 \cdot m^3$)	1000
	ek_3	1000 MWh/($10^6 \cdot m^3$)	1000
	ek_4	1000 MWh/($10^6 \cdot m^3$)	1000
	ekp	1000 MWh/($10^6 \cdot m^3$)	1000
$pr_{n,t}$	$pr_{n,t}^u$	$1 \cdot 10^6 m^3$	1 MWh
	$pr_{n,t}^l$	0 m^3	0 MWh
$rd_{n,t}$	$rd_{n,t}^u$	$1 \cdot 10^6 m^3$	1 MWh
	$rd_{n,t}^l$	$0,001 \cdot 10^6 m^3$	0,001 MWh
	v_1	0,4	0,4
	v_2	0,3	0,3
	v_3	0,2	0,2
	$kdss$	0,04	0,04
	η	0,8	0,8
	k_1	60 €	60 €
	k_2	50 €	50 €
	k_3	3,42 €/MWh	3,42 €/MWh
	k_4	500 €/pokretanju	500 €/pokretanju
	k_5	0	0
k_{spr_g}	$k_{spr_g_gornja}$	1,2	1,2
	$k_{spr_g_donja}$	0,8	0,8

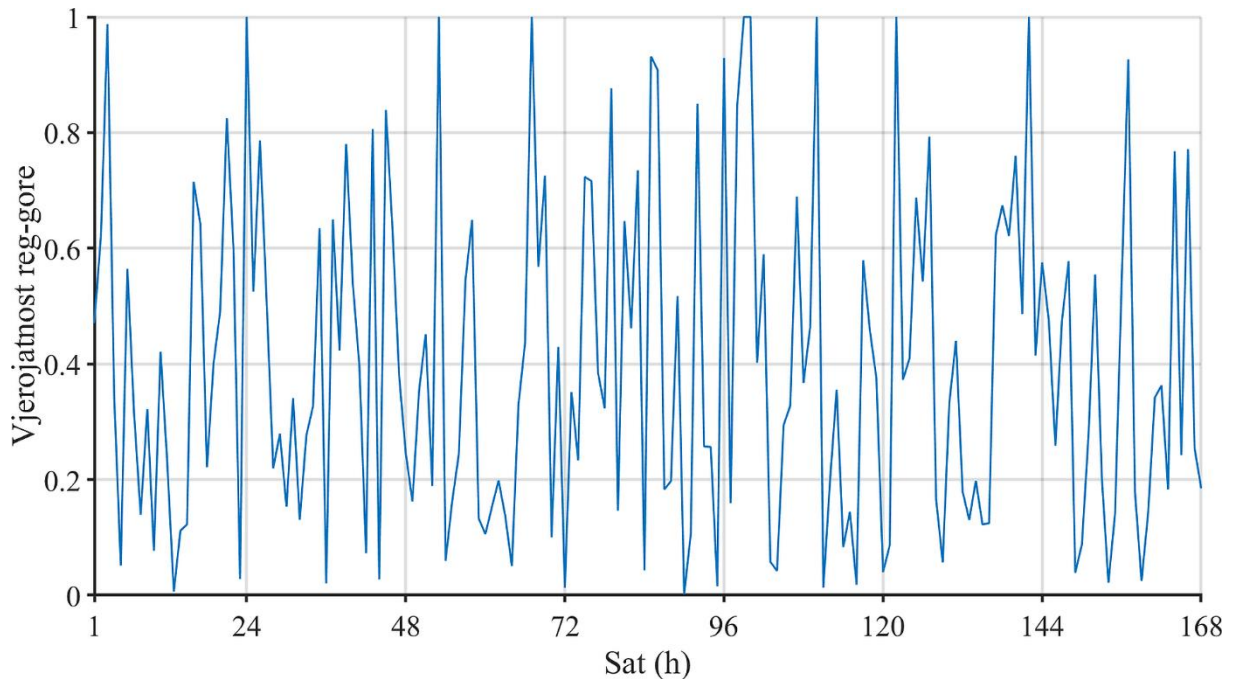
Ukoliko se koristi spremište tipa RHE, u svim primjerima uzeto je da su satni pritoci u gornji ($i_{n,t}$) i donji ($id_{n,t}$) bazen jednaki tijekom 24 sata te da je dotok gornjeg bazena jednak dotoku donjeg bazena. Vrijednosti dotoka u bazene RHE su simulirani na osnovu stvarnih izmjerenih vrijednosti godišnjeg niza srednjih dnevnih protoka na jednom mjernom mjestu u Hrvatskoj, slika 3.1.



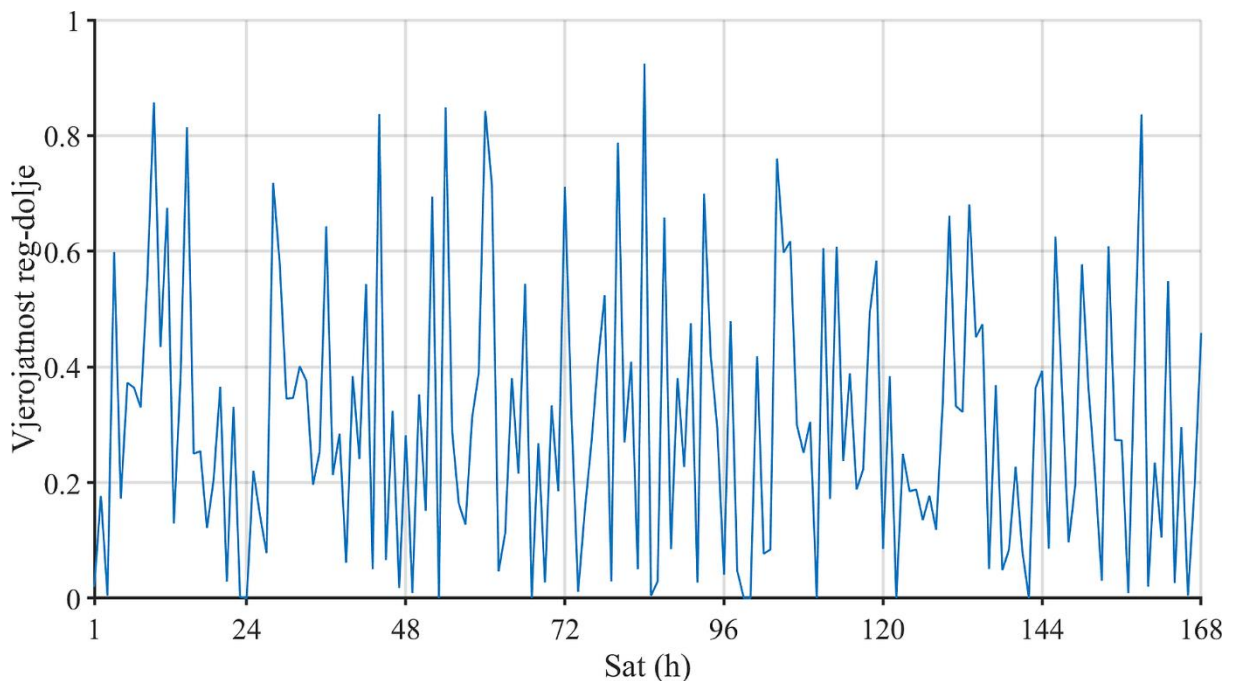
Slika 3.1 Dotok u gornji i donji bazen RHE

Također, model optimizacije rada spremišta treba podatke o vjerojatnosti ($sb_{n,t,1}-sb_{n,t,3}$) da će spremište biti pozvano da sudjeluje u pomoćnim uslugama (prema izrazima (2.6), (2.21),

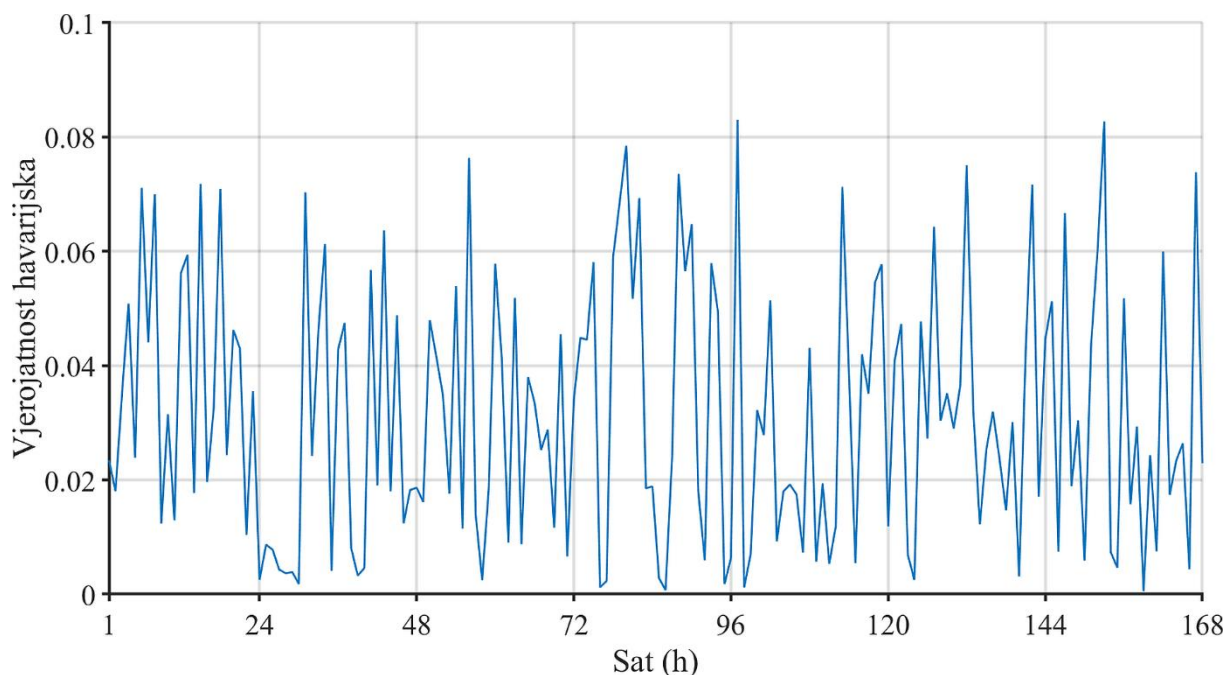
(2.22), (2.27), (2.63), (2.64)), računate prema algoritmu opisanom u poglavlju 2.2.3. Budući da su vjerojatnosti zadane za svaki sat u godini dana, zbog nepreglednosti prikaza vrijednosti za cijelu godinu, na slikama 3.2-3.4 je prikazan uzorak od tjedan dana (121.-127. dan). U svim budućim simulacijama vrijednosti tih vjerojatnosti su iste, odnosno ne mijenjaju se pri računanju nove simulacije.



Slika 3.2 Vjerojatnost proizvodnje spremišta u regulaciji prema gore



Slika 3.3 Vjerojatnost proizvodnje spremišta u regulaciji prema dolje



Slika 3.4 Vjerojatnost proizvodnje spremišta u havarijskoj rezervi

Podaci ostalih proizvodnih jedinica

Vrijednosti korištenih parametara ekvivalentne parne, plinske i kogeneracijske TE dani su u tablicama 3.2-3.4. Troškovi rada i pokretanja su odabrani sukladno [143-148].

Tablica 3.2 Vrijednosti parametara parne TE

Parna TE		
Parametri		Vrijednost
$terpa_{n,t}$	$terpa_{n,t}^u$	300 MW
	$terpa_{n,t}^l$	0 MW
$terpa_snaga_{agr}$		150 MW
$terpa_teh_min$		60 MW
c_{terpa}		50 €/MWh
c_{terpa}^{su}		70.000 €/pokretanju

Tablica 3.3 Vrijednosti parametara plinske TE

Plinska TE		
Parametri		Vrijednost
$terpl_{n,t}$	$terpl_{n,t}^u$	300 MW
	$terpl_{n,t}^l$	0 MW
$terpl_snaga_{agr}$		100 MW
$terpa_teh_min$		20 MW
c_{terpl}		75 €/MWh
c_{terpl}^{su}		10.000 €/pokretanju

Tablica 3.4 Vrijednosti parametara kogeneracijske TE

Kogeneracijska TE		
Parametri		Vrijednost
$tertop_{n,t}$	$tertop_{n,t}^u$	200 MW
	$tertop_{n,t}^l$	50 MW
$tertop_snagalagr$		100 MW
$tertop_teh_min$		40 MW
c_{tertop}		65 €/MWh
c_{tertop}^{su}		20.000 €/pokretanju

Tablice 3.5 i 3.6 prikazuju korištene vrijednosti parametara ekvivalentne protočne i akumulacijske HE. Osim fiksnih parametara navedenih u tablicama 3.5 i 3.6, u modelu je još potrebno učitati dotoke protočne ($i_{prot_{n,t}}$) i akumulacijske ($i_{aku_{n,t}}$) HE. Također su korišteni stvarni izmjereni podaci godišnjeg niza srednjih dnevnih dotoka, prikazani na slici 3.5 (mjereni na slivu rijeke Cetine pa pomnoženi s 3 u slučaju protočne HE, odnosno s 1,5 u slučaju akumulacijske HE kako bi ukupna proizvodnja ekvivalentnih HE približno odgovarala mogućoj proizvodnji HE Hrvatske).

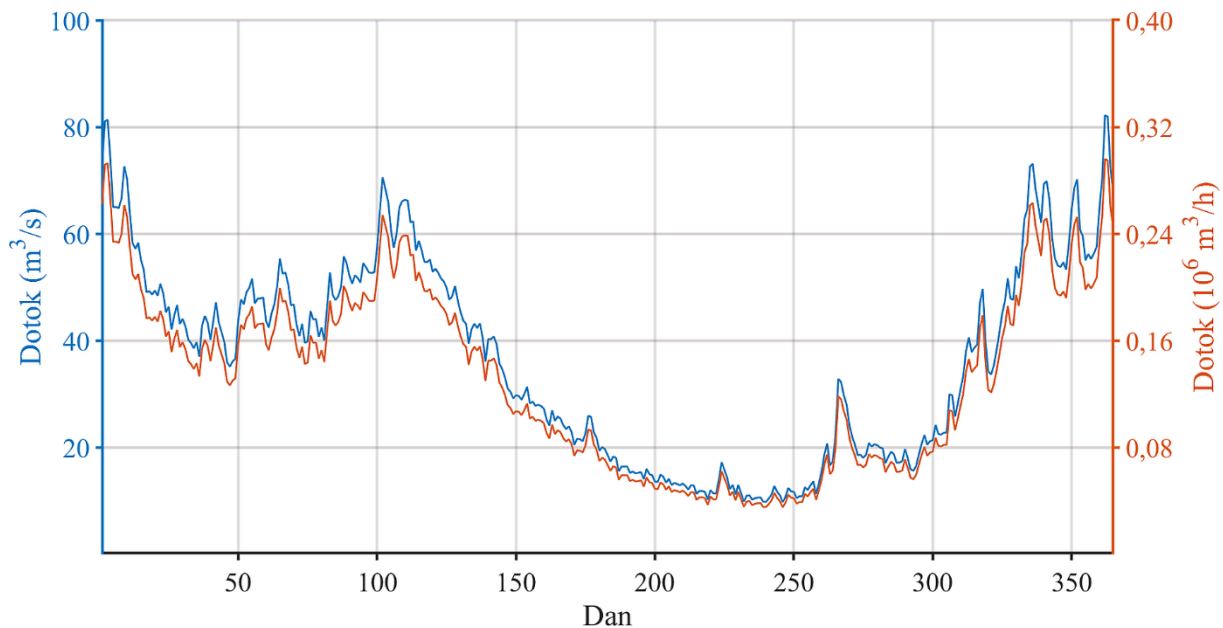
Tablica 3.5 Vrijednosti parametara protočne HE

Protočna HE		
Parametri		Vrijednost
$prot_{n,t}$	$prot_{n,t}^u$	$0,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
	$prot_{n,t}^l$	0 m^3
$prot_snagalagr$		$0,25 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
$prot_teh_min$		$0,075 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
c_{prot}		1 €/MWh
c_{prot}^{su}		700 €/pokretanju
ek_5		$1000 \text{ MWh}/(10^6 \cdot \text{m}^3)$
$i_{prot_{n,t}}$		prema slici 3.5

Tablica 3.6 Vrijednosti parametara akumulacijske HE

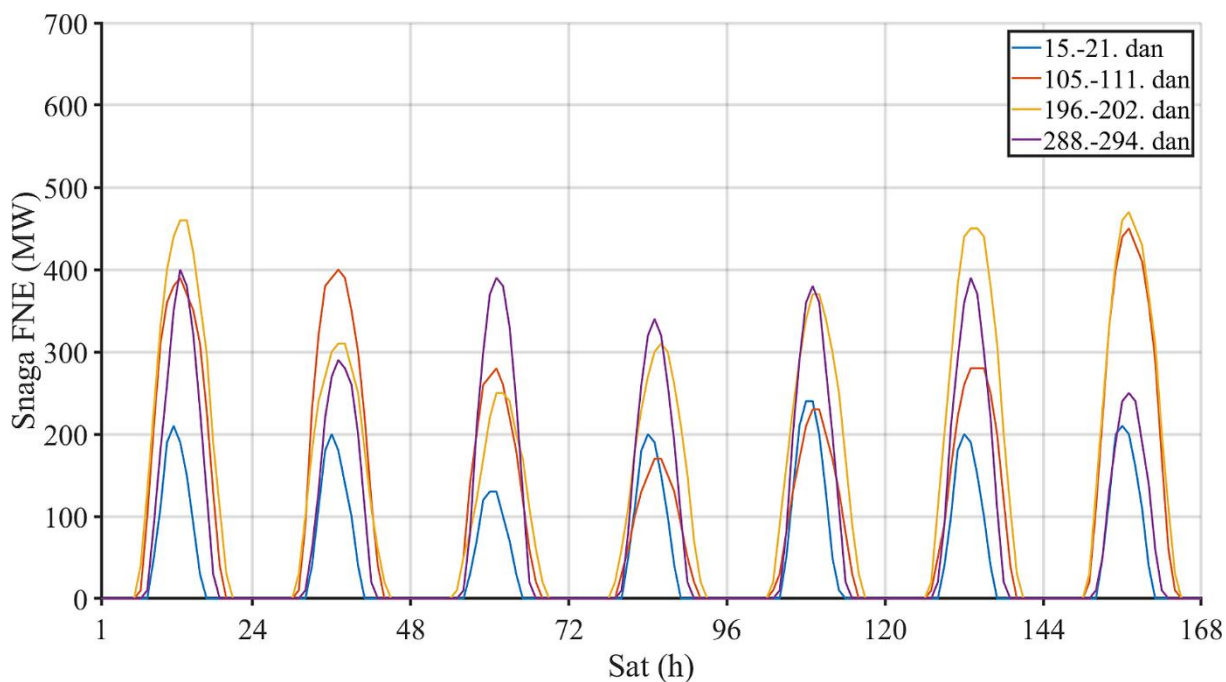
Akumulacijska HE		
Parametri		Vrijednost
$s_{aku_{1,0}}$		$25 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
$s_{aku_{n,t}}$	$s_{aku_{n,t}}^u$	$50 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
	$s_{aku_{n,t}}^l$	$2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
$aku_{n,t}$	$aku_{n,t}^u$	$0,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
	$aku_{n,t}^l$	0 m^3
$aku_snagalagr$		$0,1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

aku_teh_min		$0,02 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
$caku$		2 €/MWh
$caku^{su}$		500 €/pokretanju
ek_6		1000 MWh/($10^6 \cdot \text{m}^3$)
$i_aku_{n,t}$		prema slici 3.5
$aku_preljev_{n,t}$	$aku_preljev_{n,t}^u$	$5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
	$aku_preljev_{n,t}^l$	0 m^3
$aku_ispust_{n,t}$	$aku_ispust_{n,t}^u$	$5,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
	$aku_ispust_{n,t}^l$	$0,03 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
k_bazen_aku	$k_bazen_aku_gornja$	1,1
	$k_bazen_aku_donja$	0,9

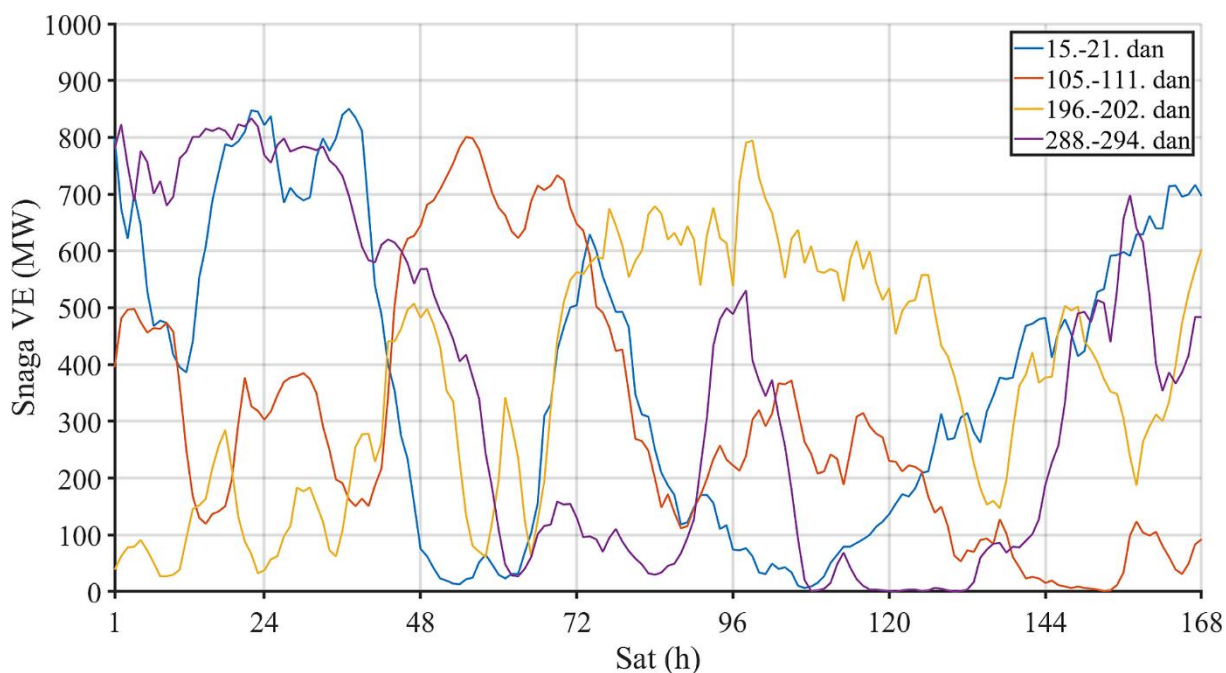


Slika 3.5 Godišnji niz izmjerenih srednjih dnevnih dotoka u HE

Korištene vrijednosti parametara za ekvivalentne FNE i VE preuzete su iz podataka o proizvodnji EES-a Hrvatske za 2021. godinu [138] te pomnožene s 10 za FNE, odnosno s 1,3 za VE. Budući da je proizvodnja FNE u 2021. godini bila doista neznatna prema proizvodnji ostalih izvora (0,469% s obzirom na ukupno godišnje opterećenje EES-a) te je tako mala proizvodnja kasnije otežavala sagledavanje utjecaja FNE na optimizaciju rada spremišta (uvijek neznatna), u osnovnom primjeru je proizvodnja FNE u svakom satu pomnožena sa spomenutim faktorom 10. U prilog tome idu i očekivanja relativno značajnog rasta FNE u budućnosti. Proizvodnja VE je već 2021. bila prilično značajna (11,4%) s tendencijom dodatnog, ali ipak blažeg rasta, pa se u primjerima ostvarena proizvodnja VE u svakom satu pomnožila s već spomenutim faktorom 1,3. Budući da bi bilo nepregledno prikazati proizvodnju spomenutih izvora za svaki sat u godini dana, slike 3.6 i 3.7 prikazuju proizvodnju jednog tjedna u 1., 4., 7. i 10. mjesecu. Odabirom navedenih mjeseci prikazala se tjedna proizvodnja spomenutih izvora u 4 različita godišnja doba.



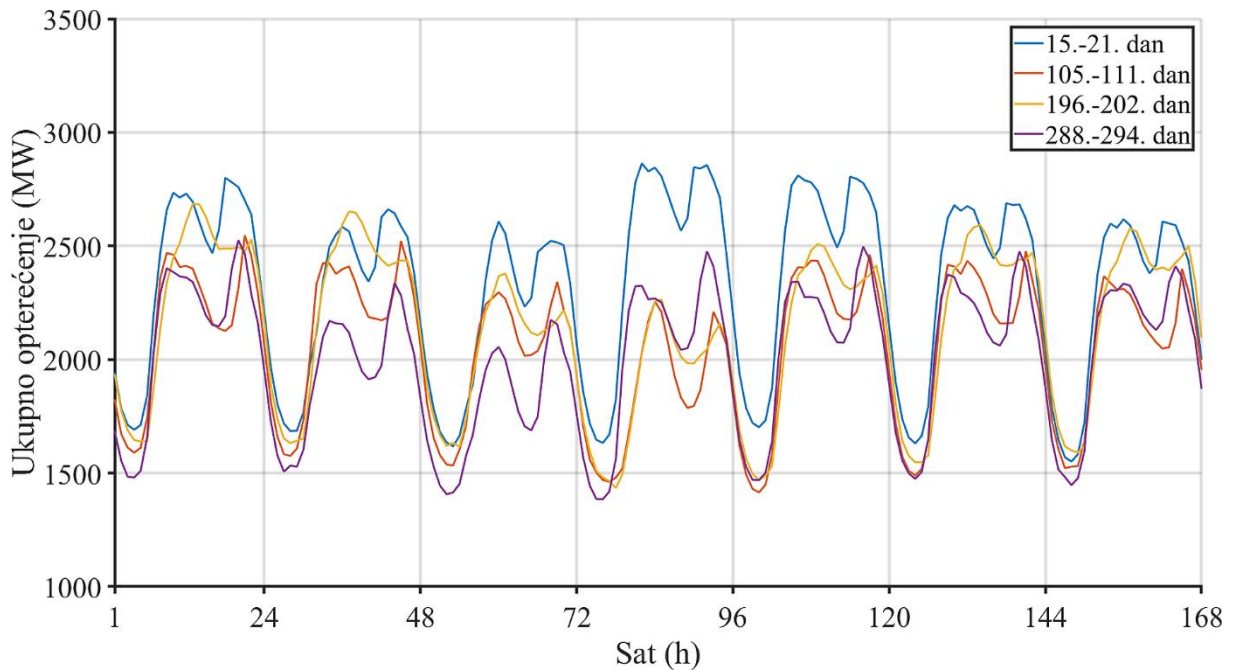
Slika 3.6 Tjedna proizvodnja FNE



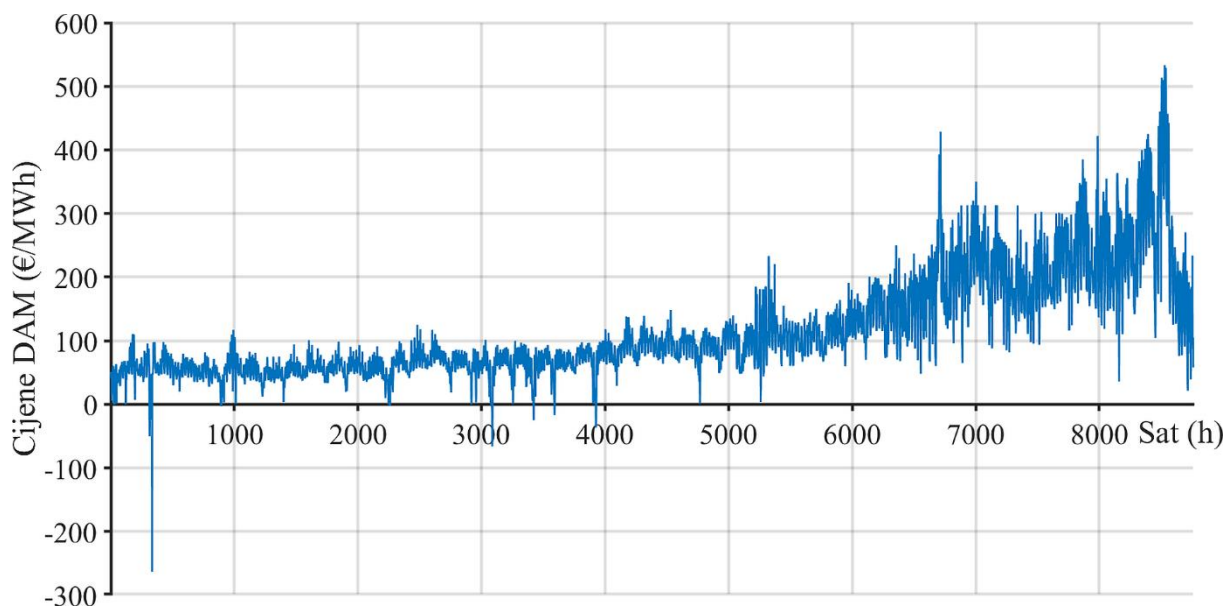
Slika 3.7 Tjedna proizvodnja VE

Vrijednosti satne potrošnje korištene u primjerima su vrijednosti ukupnog opterećenja EES-a Hrvatske za 2021. godinu [138] koje iznosi 18.152.767 MWh. Budući da bi bilo nepregledno prikazati satnu potrošnju u godini dana, slika 3.8 prikazuje satnu potrošnju jednog tjedna (isti tjedni kao u slučaju prikaza proizvodnje FNE i VE) u 1., 4., 7. i 10. mjesecu.

Za podatke o satnim cijenama energije ($c_{n,t,4}^e$) korištene su ostvarene cijene na hrvatskoj burzi električne energije CROPEX (DAM tržište) za 2021. godinu [138], slika 3.9. Cijene pomoćnih usluga za snagu ($c_{n,t,1}-c_{n,t,3}$) jednake su cijenama energije na DAM-u uvećane za 40% (sukladno praksi u EES-u Hrvatske), dok su cijene energije pomoćnih usluga ($c_{n,t,1}^e-c_{n,t,3}^e$) fiksne te iznose 8 €/MWh, 6 €/MWh i 8 €/MWh za regulaciju prema gore, regulaciju prema dolje i havarijsku rezervu (sukladno cijenama u EES-u Hrvatske za 2021. godinu). Satne cijene uvezene energije u svim primjerima simulirane su kao satne cijene energije ostvarene na burzi CROPEX uvećane za 30%, a satne cijene izvezene energije simulirane su kao satne cijene energije ostvarene na burzi CROPEX smanjene za 30%.



Slika 3.8 Tjedni prikaz ukupnog opterećenja EES-a Hrvatske



Slika 3.9 Cijene energije sa CROPEX-a na DAM tržištu

Na kraju pregleda podataka korištenih u osnovnom primjeru, godišnja bilanca energije sustava korištenog u primjeru (prikazana u %) dana je u tablici 3.7 uz optimalni rad spremišta tipa RHE.

Tablica 3.7 Godišnji postotni udio energija proizvodnih jedinica te uvoza i izvoza

RHE	Proizvodnja	3,68 %
	Pumpanje	-0,56 %
Parna TE		13,9 %
Plinska TE		12,47 %
TE-TO		9,07 %
Protočna HE		16,71 %
Akumulacijska HE		9,51 %
FNE		4,65 %
VE		14,75 %
Uvoz		17,02 %
Izvoz		-1,20 %
Ukupno opterećenje		100 %

3.2. Utjecaj koeficijenta učinkovitosti (η) na optimalni režim rada spremišta

Ispitivanje utjecaja koeficijenta učinkovitosti (η) na optimalni rad spremišta je provedeno na osnovnom primjeru s tim da je umjesto fiksnog ($\eta=0,8$), koeficijent učinkovitosti mijenjan u granicama od 0,5 do 1 s korakom od 0,1.

Ispitivanje je provedeno na način da je proizvodnja svih ostalih proizvodnih postrojenja zanemarena, a ukupnu dobit (prihod umanjeno za troškove pogona) spremište ostvaruje na

kompetitivnom tržištu kroz arbitražu te kroz ponudu i obavljanje pomoćnih usluga (reg-up, reg-down i havarijska rezerva). Drugim riječima, u funkciji cilja su se uzeli u obzir samo članovi koji se odnose na rad spremišta (1.-13. člana), dok su svi ostali postavljeni na vrijednost 0. Rezultati ispitivanja za spremište tipa RHE su prikazani u tablicama 3.8 do 3.10. Dio rezultata je predočen i grafički na slikama 3.10-3.13.

Tablica 3.8 Energije i snage spremišta u slučaju promjene η

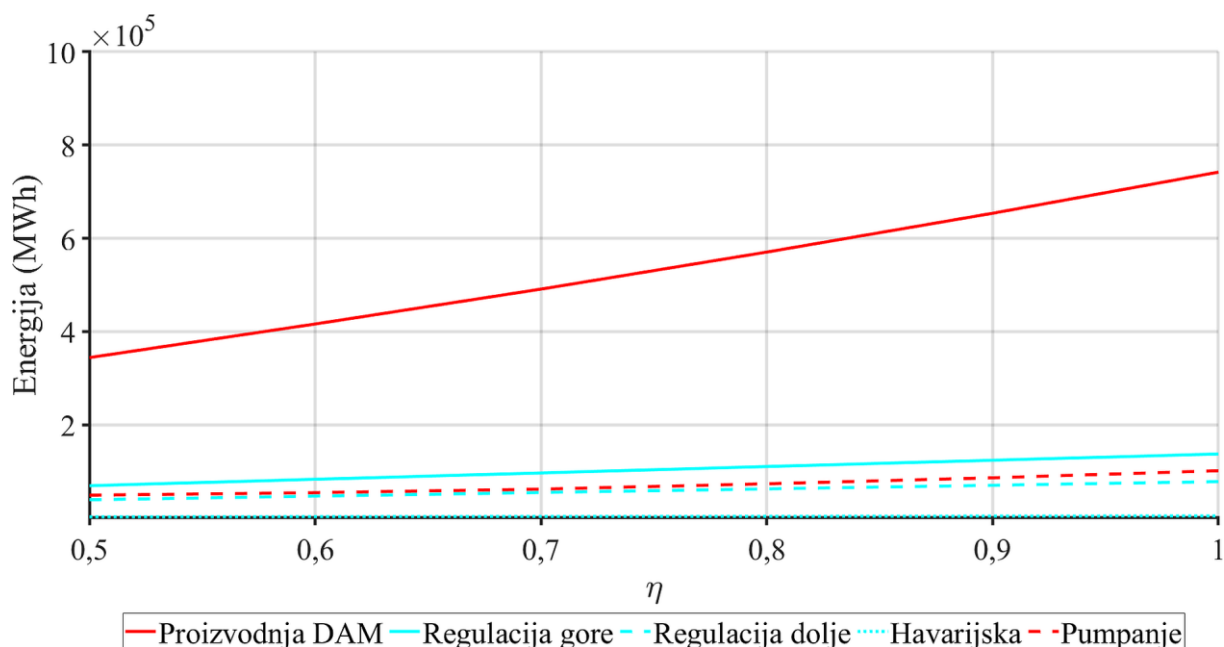
Energije (MWh)						
η	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
DAM	344.067	416.177	491.040	570.503	653.784	742.053
Reg-up	69.238	82.995	96.627	110.333	123.870	137.245
Reg-down	39.047	46.846	54.635	62.411	70.212	78.007
Havarijska	2.358	2.826	3.270	3.665	4.023	4.347
Pumpanje	48.954	54.309	61.869	73.334	86.239	101.359
Snage (MW)						
η	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Reg-up	346.849	346.621	346.292	346.098	345.708	345.263
Reg-down	260.220	260.191	260.073	259.920	259.890	259.815
Havarijska	158.140	158.040	156.800	154.080	150.520	146.320

Tablica 3.9 Sati rada RHE i angažirana snaga u slučaju promjene η

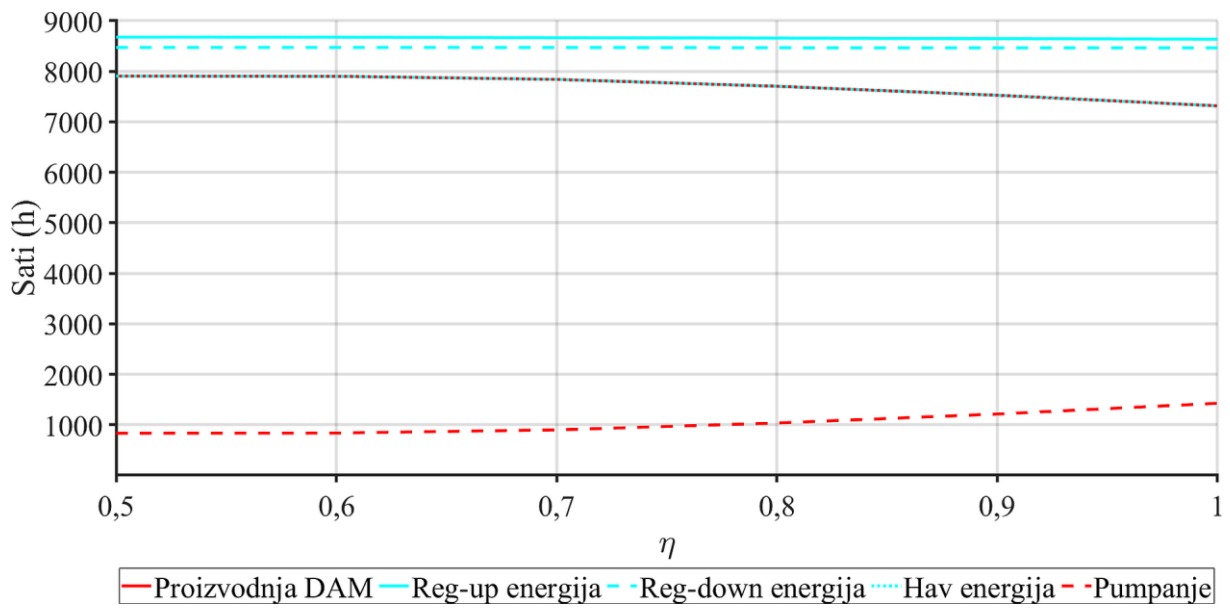
Sati rada (h)						
η	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Mirovanje	21	21	21	21	21	18
DAM	7.907	7.902	7.840	7.704	7.526	7.316
Reg-up snaga	8.678	8.675	8.667	8.657	8.647	8.637
Reg-up energija	8.678	8.675	8.667	8.657	8.647	8.637
Reg-down snaga	8.674	8.674	8.670	8.664	8.663	8.663
Reg-down energija	8.475	8.475	8.472	8.466	8.465	8.465
Havarijska snaga	7.907	7.902	7.840	7.704	7.526	7.316
Havarijska energija	7.907	7.902	7.840	7.704	7.526	7.316
Pumpanje	832	837	899	1.035	1.213	1.426
Preljev	257	258	250	259	267	244
Angažirana snaga (%)						
η	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
0-50 MW	0	0	0	0	0	0
50,1-100 MW	57	56	54	51	46	41
100,1-150 MW	2	2	3	3	3	3
150,1-200 MW	41	42	43	46	51	56

Tablica 3.10 Prihodi, troškovi pogona i dobit RHE u slučaju promjene η

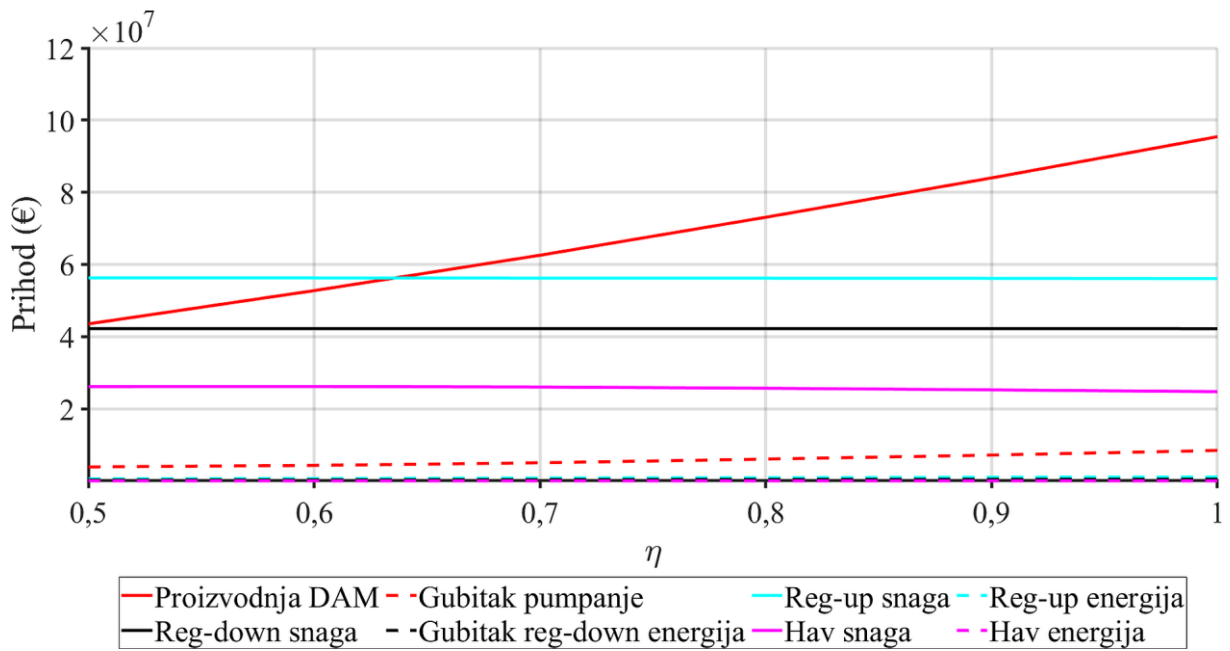
Prihodi (€)						
η	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
DAM	43.520.597	52.743.561	62.550.690	73.081.426	83.985.363	95.412.979
Gubitak pumpanja	3.867.328	4.305.273	5.015.896	6.046.480	7.158.345	8.436.267
Reg-up snaga	56.264.217	56.243.493	56.212.546	56.191.288	56.163.420	56.091.171
Reg-up energija	553.905	663.963	773.016	882.666	990.958	1.097.959
Reg-down snaga	42.239.940	42.239.974	42.235.356	42.225.818	42.222.701	42.217.927
Gubitak reg-down energija	234.280	281.077	327.808	374.466	421.272	468.043
Havarijska snaga	26.161.305	26.177.701	26.026.204	25.667.396	25.240.134	24.737.373
Havarijska energija	18.866	22.609	26.158	29.317	32.183	34.773
Troškovi pogona (€)						
η	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Fiksni trošak	525.600	525.600	525.600	525.600	525.600	525.600
Ovisan o radu	436.950	436.950	436.950	436.950	436.950	437.100
Ovisan o energiji	1.455.451	1.742.359	2.045.744	2.378.351	2.728.147	3.101.927
Trošak pokretanja	205.500	215.500	227.500	243.500	257.500	290.000
Ukupna dobit (€)						
η	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Dobit	162.033.720	170.584.541	179.244.470	188.072.565	197.106.946	206.333.246



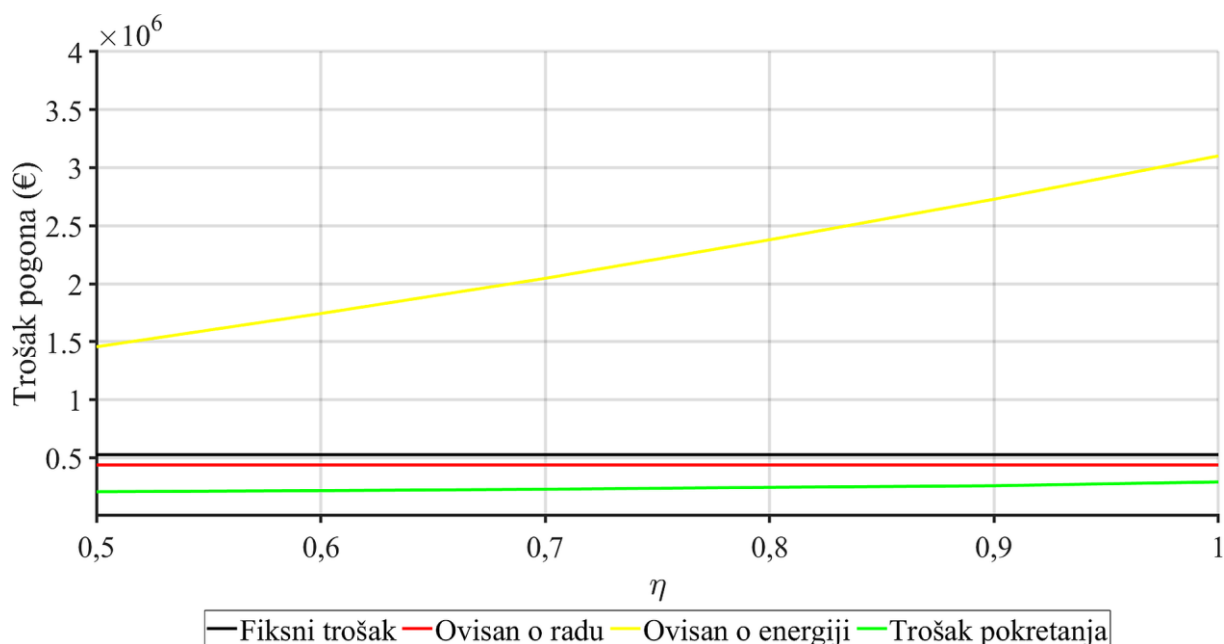
Slika 3.10 Energije RHE u slučaju promjene η



Slika 3.11 Sati rada RHE u slučaju promjene η



Slika 3.12 Prihodi od različitih usluga RHE u slučaju promjene η



Slika 3.13 Troškovi pogona RHE u slučaju promjene η

Analizom rezultata može se uočiti sljedeće s porastom koeficijenta učinkovitosti:

- značajno (približno linearno) povećanje proizvodnje energije za sve usluge, te proporcionalno povećanje energije za pumpanje, tablica 3.8 i slika 3.10
- zanemariv utjecaj na snage pomoćnih usluga, tablica 3.8
- blago smanjenje sati rada za pružanje svih usluga (jer je spremište efikasnije), ali uz angažiranje prosječno sve veće snage, tablica 3.9 i slika 3.11
- značajan porast prihoda i rashoda od energije za sve usluge i približno konstantan prihod od angažirane snage, tablica 3.10 te slika 3.12 i 3.13.

Slično ispitivanje je provedeno i na spremištu tipa baterija gdje su pritoci u gornji i donji bazen postavljeni na vrijednost 0, a donji bazen je predimenzioniran da praktički ne predstavlja nikakvo ograničenje. Također se mijenjao koeficijent učinkovitosti u granicama od 0,5 do 1 s korakom od 0,1. Rezultati proračuna su vrlo slični te stoga i nisu u ovom radu dani kao posebno ispitivanje, već su detaljnije prikazani u [22]. Ukupna energija za arbitražu, te ostvareni prihodi su nešto manji kod baterije (nema dotoka u gornji bazen), no trendovi su vrlo slični prethodno navedenim.

Dakle, koeficijent učinkovitosti ima izuzetno veliki utjecaj na režim rada spremišta energije. Efikasnije spremište će imati puno više prostora za ostvarivanje prihoda te će raditi i kod manjih varijacija u cijenama energije, dok će manje efikasno spremište zaradu usmjeriti na prodaju snage jer često puta neće biti opravdan ciklus punjenja i pražnjenja spremišta. Kako se

spremištu, uz cijene kao u primjeru, uvijek isplati ostvarivati prihod kroz rezervaciju snage za pomoćne usluge, s porastom koeficijenta učinkovitosti raste prihod od arbitraže i udio prihoda od arbitraže u ukupnoj dobiti.

Na sličan način kako se ispitivao utjecaj učinkovitosti, može se ispitati i utjecaj drugih relevantnih veličina spremišta.

3.3. Utjecaj spremišta na smanjenje troška zbog neisporučene energije proizvodnih kompanija

U ovoj grupi proračuna ispitivao se utjecaj rada spremišta tipa baterije i RHE sa stajališta vlasnika GENCO-a poduzeća na liberaliziranom tržištu koji plaća penale ako ne isporuči ugovorenu energiju. Pretpostavljeno je da promatrani GENCO u svom portfelju ima VE i FNE godišnje proizvodnje na razini 20% proizvodnje energije iz vjetra i sunca kao u osnovnom primjeru, tj. promatrani GENCO ostvaruje 20% proizvodnje iz IOIE. Prema ugovoru mora isporučiti u mrežu minimalno 100 MWh u svakom satu, što mu se plaća prema cijeni energije na burzi, dok za neisporučenu energiju plaća penale od 200 € za svaki neisporučeni MWh.

Budući da je GENCO-u od interesa FNE, VE i spremište, u funkciji cilja (2.3) su se uzeli u obzir samo članovi koji se odnose na spremište (1. – 13. član), FNE i VE (19. i 20. član) te naplata penala za neisporučenu energiju (23. član), dok su svi ostali članovi funkcije cilja postavljeni na vrijednost 0. U slučaju baterije, dotok u gornju akumulaciju spremišta je postavljen na iznos 0, a donja akumulacija je predimenzionirana te su koeficijenti $k_{prtok_g_n}$ i $k_{spr_d_n}$ postavljeni na vrijednost 1, dok je $s_{n,t}^l=0$. Ostali parametri koji su se mijenjali u simulacijama sa spremištem, prikazani su u tablici 3.11. Treba napomenuti da se u ovoj grupi proračuna s porastom snage spremišta povećava i maksimalna snaga pomoćnih usluga ($h_{n,t,1}^u$, $h_{n,t,2}^u$, $h_{n,t,3}^u$) prikazanih u tablici, koji su za RHE izraženi u 10^6 m^3 , a za bateriju u MWh.

Tablica 3.11 Parametri spremišta koji se mijenjaju u simulaciji u slučaju GENCO-a

Snaga spremišta	100 MW	200 MW	300 MW	400 MW
$h_{n,t,4}^u$ (10^6 m^3 , MWh)	0,1	0,2	0,3	0,4
$p_{n,t}^u$ (10^6 m^3 , MWh)	0,05	0,1	0,2	0,3
$h_{n,t,1}^u$ (10^6 m^3 , MWh)	0,02	0,04	0,06	0,08
$h_{n,t,2}^u$ (10^6 m^3 , MWh)	0,015	0,03	0,045	0,06
$h_{n,t,3}^u$ (10^6 m^3 , MWh)	0,01	0,02	0,03	0,04
$s_{n,t}^u$ (10^6 m^3 , 1000 MWh)	3	6	9	12
$s_{0,n,t}$ (10^6 m^3 , 1000 MWh)	1,5	3	4,5	6
k_1 (€)	36	60	84	108
k_2 (€)	30	50	70	90
k_4 (€/pokretanju)	300	500	700	900

Najprije je simuliran pogon bez spremišta i to posebno bez klauzule o penalima i s klauzulom o penalima zbog neisporučene ugovorene energije, a potom sa spremištem u rasponu snage 100 do 400 MW i spomenutim penalima. Rezultati navedenih simulacija prikazani su u tablicama 3.12-3.15, a dio rezultata je predočen i grafički na slikama 3.14-3.26.

Prije detaljnije analize rezultata treba napomenuti da je u nekoliko sati u promatranoj godini zabilježena negativna cijena energije na burzi. To je razlog zašto se u simulacijama pogona bez spremišta energije javljaju sitne razlike u proizvedenoj energiji i satima rada IOIE u varijanti bez klauzule o penalima i s klauzulom. Uz klauzulu o penalima, GENCO poduzeću je povoljnije proizvoditi i plasirati energiju po negativnoj cijeni nego plaćati penale za neisporučenu energiju. Kada takve klauzule nema, GENCO poduzeće zaustavit će proizvodnju u vrijeme negativnih cijena energije.

Analizirajući rezultate može se uočiti da povećanjem snage spremišta:

- značajno raste energija i snaga oba spremišta za sve usluge, tablica 3.12 i slike 3.14-3.17
- vrijeme pružanja svih usluga neznatno varira, samo se vrijeme za punjenje/pumpni pogon značajno povećava. Sati rada na DAM-u su kod baterije dosta manji nego kod RHE koja iskorištava prirodni dotok u gornji bazen. Povećanjem snage spremišta sati rada prodaje energije na DAM-u se smanjuju i u slučaju baterije i u slučaju RHE, također zbog dotoka, tablica 3.13 te slike 3.18 i 3.19
- sukladno rastu energija i snaga svih usluga, rasti i prihodi za oba spremišta, tablica 3.14 te slike 3.20 i 3.21
- trošak ovisan o proizvedenoj energiji i trošak pokretanja se razlikuju. Budući da je RHE-u dostupna veća energija zbog dotoka, spremište će proizvoditi više energije te će imati veće spomenute troškove, dok će troškovi pokretanja kod baterije biti veći zato što se baterija češće pali/gasi te češće mijenja režim punjenja i pražnjenja, tablica 3.14 te slika 3.22 i 3.23
- dobit bez spremišta u oba slučaja je ista, dok u slučaju sa spremištem s povećanjem snage raste. Zbog dotoka u slučaju RHE, dobit je veća, tablica 3.14 te slika 3.24
- uspoređujući troškove i energije penala koje plaća GENCO u pogonu s i bez spremišta, u slučaju baterije, trošak je manji za snage spremišta od 100 MW i 200 MW, dok je za snage spremišta 300 MW i 400 MW veći jer se spremištu više isplati plaćati veće penale da bi raspoloživu energiju mogao iskoristiti u nekom drugom "povoljnijem" trenutku. U slučaju RHE, trošak je manji u svim slučajevima snaga spremišta, ali kod snage 300

MW i 400 MW postupno povećava penale iz razloga kao kod baterije, tablica 3.15 te slike 3.25 i 3.26.

Dakle, uspoređujući rezultate optimalnog rada baterije i RHE, vidi se da dotok u gornju akumulaciju RHE ima znatan utjecaj na arbitražu (energija DAM i punjenje/pumpanje), dok je utjecaj na pomoćne usluge (energiju i snagu) neznatan. U slučaju RHE bez dotoka u akumulaciju, optimalni režim rada bi bio vrlo sličan.

Tablica 3.12 Energije i snage proizvodnje spremišta u slučaju GENCO-a

	Energije (MWh)							
	Bez spremišta		Sa spremištem i penalima					
	Bez penala	Sa penalima	100 MW	200 MW	300 MW	400 MW		
Baterija	DAM	0	0	83.728	142.392	199.022	241.747	
	Reg-up	0	0	25.031	50.038	74.564	97.362	
	Reg-down	0	0	31.187	62.571	93.775	124.525	
	Havarijska	0	0	911	1.652	2.355	2.902	
	Punjenje	0	0	96.609	161.399	223.221	265.878	
	FNE	168.738	169.493	170.039	170.224	170.224	170.224	
	VE	535.396	537.770	538.075	538.079	538.079	538.079	
		Snage (MW)						
		Bez spremišta		Sa spremištem i penalima				
		Bez penala	Sa penalima	100 MW	200 MW	300 MW	400 MW	
	Reg-up	0	0	82.520	165.245	247.146	326.283	
	Reg-down	0	0	129.363	260.538	391.224	521.102	
	Havarijska	0	0	38.468	69.520	99.300	122.000	
RHE		Energije (MWh)						
		Bez spremišta		Sa spremištem i penalima				
		Bez penala	Sa penalima	100 MW	200 MW	300 MW	400 MW	
		DAM	0	0	444.670	608.959	695.257	743.577
		Reg-up	0	0	26.286	54.451	80.007	102.831
		Reg-down	0	0	30.637	62.528	93.863	124.679
		Havarijska	0	0	1.687	3.642	5.120	6.385
		Pumpanje	0	0	11.969	29.621	51.690	74.446
		FNE	168.738	169.493	169.463	169.584	169.903	170.053
		VE	535.396	537.770	537.936	538.067	538.075	538.058
	Snage (MW)							
	Bez spremišta		Sa spremištem i penalima					
	Bez penala	Sa penalima	100 MW	200 MW	300 MW	400 MW		
	Reg-up	0	0	80.448	171.980	255.288	334.035	
	Reg-down	0	0	129.033	260.695	391.531	521.088	
	Havarijska	0	0	70.477	152.960	216.030	269.200	

Tablica 3.13 Sati rada spremišta u slučaju GENCO-a

	Sati rada (h)						
	Bez spremišta		Sa spremištem i penalima				
	Bez penala	Sa penalima	100 MW	200 MW	300 MW	400 MW	
Baterija	Mirovanje	8.760	8.760	13	15	16	14
	DAM	0	0	3.861	3.477	3.311	3.050
	Reg-up snaga	0	0	8.364	8.408	8.426	8.423
	Reg-up energija	0	0	8.364	8.408	8.426	8.423
	Reg-down snaga	0	0	8.652	8.704	8.714	8.721
	Reg-down energija	0	0	8.455	8.505	8.515	8.522
	Havarijska snaga	0	0	3.849	3.476	3.310	3.050
	Havarijska energija	0	0	3.849	3.476	3.310	3.050
	Punjenje	0	0	4.886	5.268	5.433	5.696
	FNE	4.219	4.238	4.241	4.241	4.241	4.241
	VE	8.680	8.718	8.718	8.718	8.718	8.718
	RHE	Sati rada (h)					
		Bez spremišta		Sa spremištem i penalima			
Bez penala		Sa penalima	100 MW	200 MW	300 MW	400 MW	
Mirovanje		8.760	8.760	29	26	4	11
DAM		0	0	8.136	7.664	7.219	6.751
Reg-up snaga		0	0	8.107	8.654	8.596	8.520
Reg-up energija		0	0	8.107	8.654	8.596	8.520
Reg-down snaga		0	0	8.618	8.693	8.709	8.706
Reg-down energija		0	0	8.418	8.493	8.509	8.506
Havarijska snaga		0	0	7.161	7.648	7.201	6.730
Havarijska energija		0	0	7.161	7.648	7.201	6.730
Pumpanje		0	0	595	1.070	1.537	1.998
FNE		4.219	4.238	4.238	4.239	4.241	4.240
VE	8.680	8.718	8.718	8.718	8.718	8.718	

Tablica 3.14 Prihodi, troškovi pogona i dobit GENCO-a

	Prihodi (€)						
	Bez spremišta		Sa spremištem i penalima				
	Bez penala	Sa penalima	100 MW	200 MW	300 MW	400 MW	
Baterija	DAM	0	0	11.533.440	20.282.817	29.354.093	36.582.378
	Gubitak punjenja	0	0	9.927.104	17.171.000	23.946.380	29.089.853
	Reg-up snaga	0	0	13.677.587	27.362.051	40.982.046	54.195.519
	Reg-up energija	0	0	200.248	400.304	596.508	778.898
	Reg-down snaga	0	0	21.032.283	42.186.748	63.296.190	84.359.557
	Gubitak reg-down energija	0	0	187.122	375.425	562.653	747.151
	Havarijska snaga	0	0	7.594.055	13.954.504	20.534.648	25.882.445
	Havarijska energija	0	0	7.289	13.216	18.843	23.218
	FNE	17.517.047	17.500.403	17.492.541	17.489.934	17.489.934	17.489.934
	VE	66.746.043	66.708.690	66.702.743	66.702.631	66.702.631	66.702.631

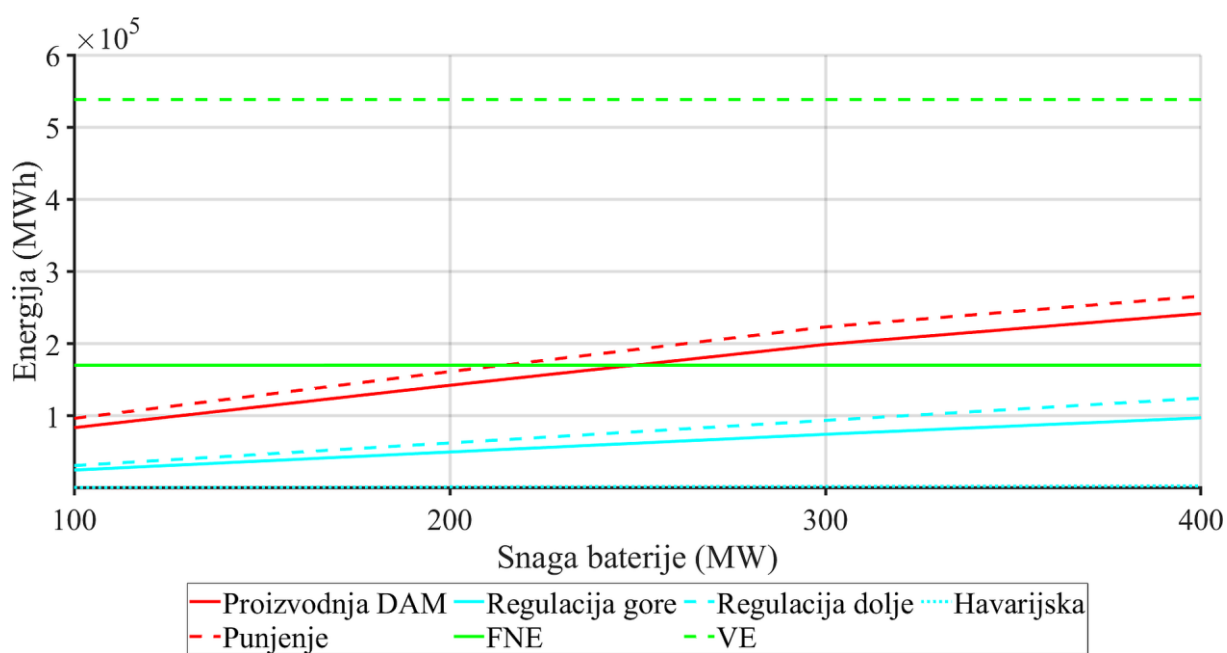
	Troškovi pogona (€)					
	Bez spremišta		Sa spremištem i penalima			
	Bez penala	Sa penalima	100 MW	200 MW	300 MW	400 MW
Fiksni trošak	0	0	315.360	525.600	735.840	946.080
Ovisan o radu	0	0	262.410	437.250	612.080	787.140
Ovisan o energiji	0	0	598.815	1.001.751	1.386.423	1.653.109
Trošak pokretanja	0	0	407.700	685.000	879.900	1.087.200
	Ukupna dobit (€)					
	Bez spremišta		Sa spremištem i penalima			
	Bez penala	Sa penalima	100 MW	200 MW	300 MW	400 MW
Dobit	84.263.090	24.913.702	70.348.211	110.101.511	148.417.303	184.204.150
	Prihodi (€)					
	Bez spremišta		Sa spremištem i penalima			
	Bez penala	Sa penalima	100 MW	200 MW	300 MW	400 MW
DAM	0	0	51.646.726	77.257.978	93.432.045	103.518.780
Gubitak pumpanja	0	0	1.136.095	2.909.202	4.922.051	7.256.573
Reg-up snaga	0	0	13.363.808	27.936.188	41.634.122	54.934.554
Reg-up energija	0	0	210.289	435.605	640.059	822.644
Reg-down snaga	0	0	21.033.968	42.237.991	63.348.368	84.418.869
Gubitak reg-down energija	0	0	183.823	375.166	563.176	748.076
Havarijska snaga	0	0	11.865.949	25.181.505	35.996.352	45.507.046
Havarijska energija	0	0	13.496	29.136	40.960	51.080
FNE	17.517.047	17.500.403	17.500.875	17.501.429	17.496.378	17.491.944
VE	66.746.043	66.708.690	66.706.012	66.702.822	66.702.640	66.702.679
	Troškovi pogona (€)					
	Bez spremišta		Sa spremištem i penalima			
	Bez penala	Sa penalima	100 MW	200 MW	300 MW	400 MW
Fiksni trošak	0	0	315.360	525.600	735.840	946.080
Ovisan o radu	0	0	261.930	436.700	612.920	787.410
Ovisan o energiji	0	0	1.552.596	2.168.776	2.524.684	2.744.752
Trošak pokretanja	0	0	85.200	237.000	471.100	733.500
	Ukupna dobit(€)					
	Bez spremišta		Sa spremištem i penalima			
	Bez penala	Sa penalima	100 MW	200 MW	300 MW	400 MW
Dobit	84.263.090	24.913.702	165.100.250	238.597.039	295.956.979	344.149.406

RHE

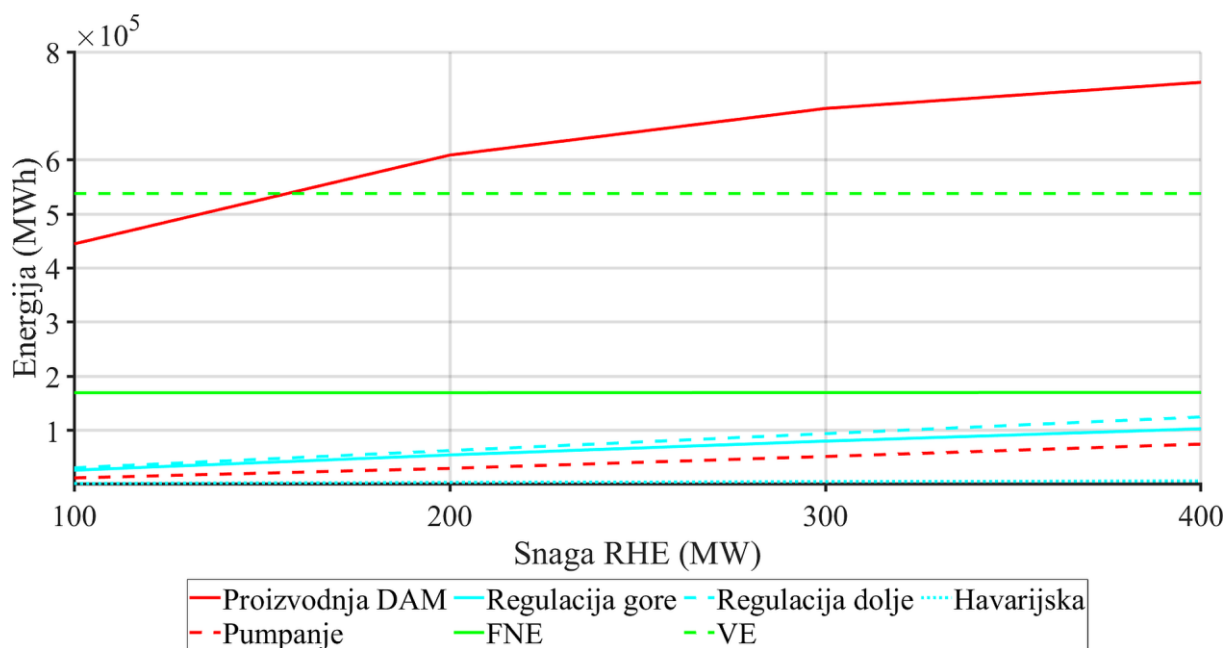
Tablica 3.15 Iznos ukupne energije penala (MWh) i trošak penala (€)

Baterija		Bez spremišta		Sa spremištem i penalima			
		Bez penala	Sa penalima	100 MW	200 MW	300 MW	400 MW
		Ukupna energija penala	0	296.477	280.967	290.473	312.172
Trošak penala	0	59.295.392	56.193.462	58.094.668	62.434.316	67.499.897	

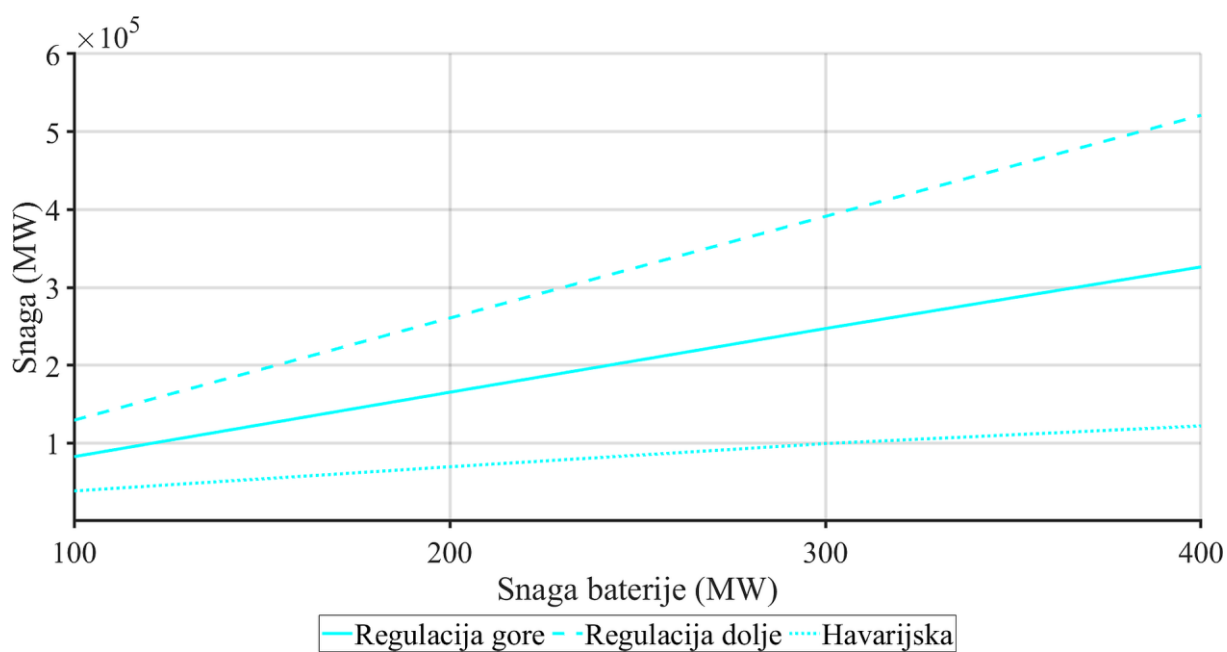
RHE		Bez spremišta		Sa spremištem i penalima			
		Bez penala	Sa penalima	100 MW	200 MW	300 MW	400 MW
		Ukupna energija penala	0	296.477	68.529	60.166	67.521
Trošak penala	0	59.295.392	13.705.869	12.033.172	13.504.173	16.081.801	



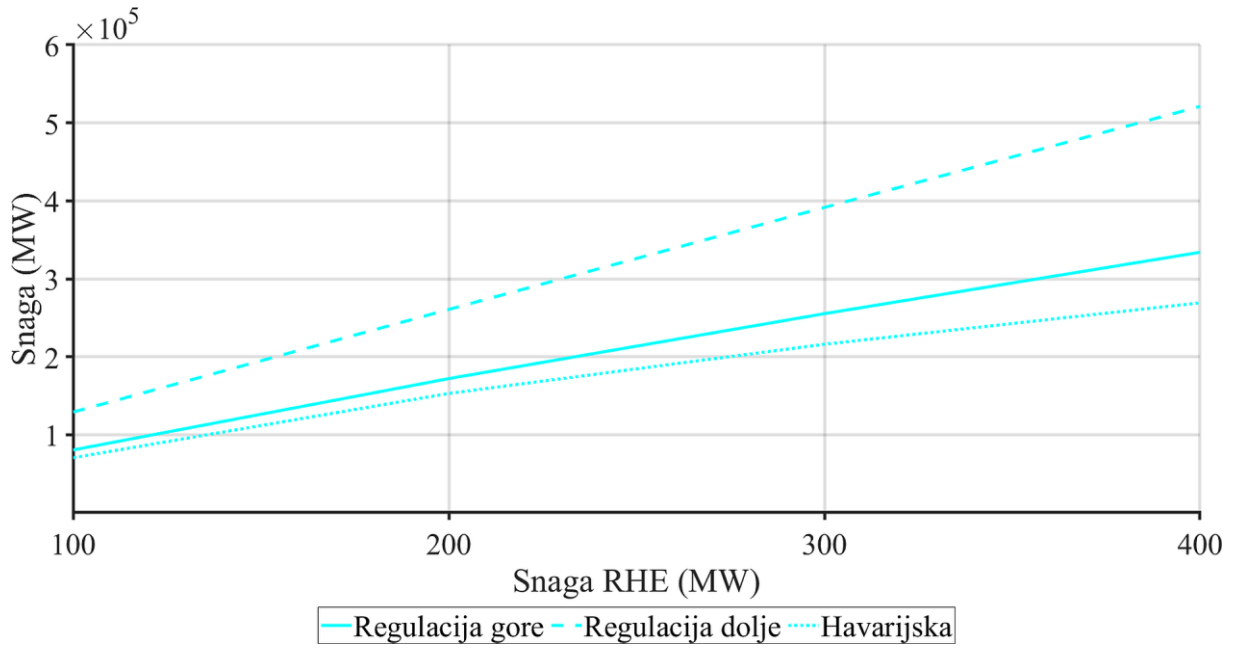
Slika 3.14 Energije baterije, FNE i VE u slučaju GENCO-a



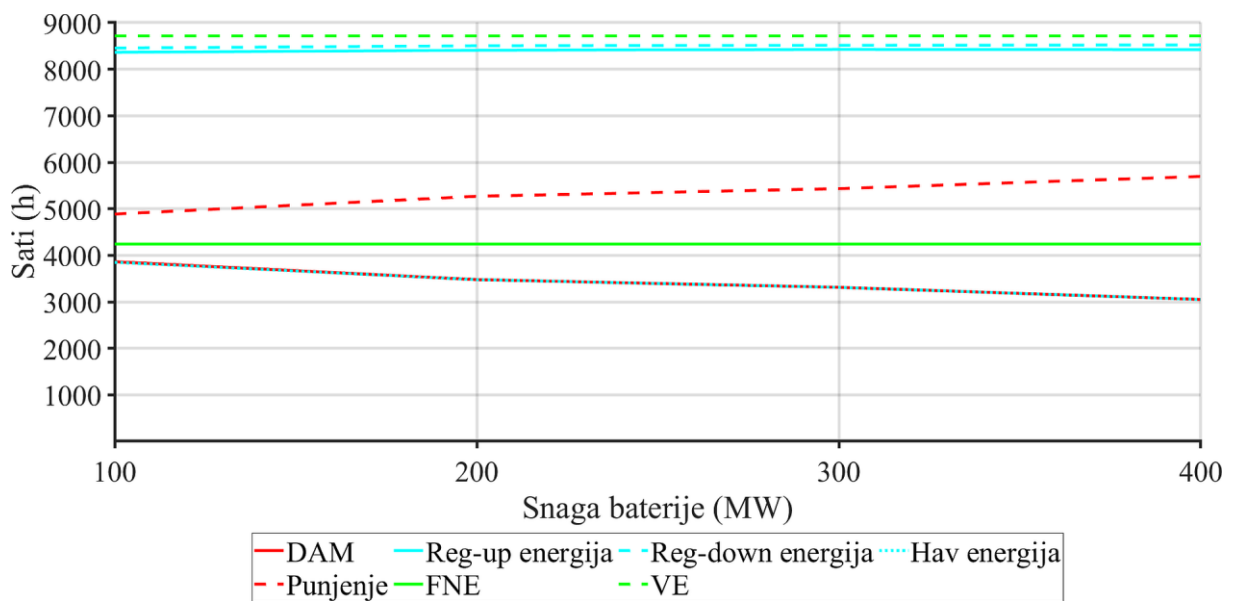
Slika 3.15 Energije RHE, FNE i VE u slučaju GENCO-a



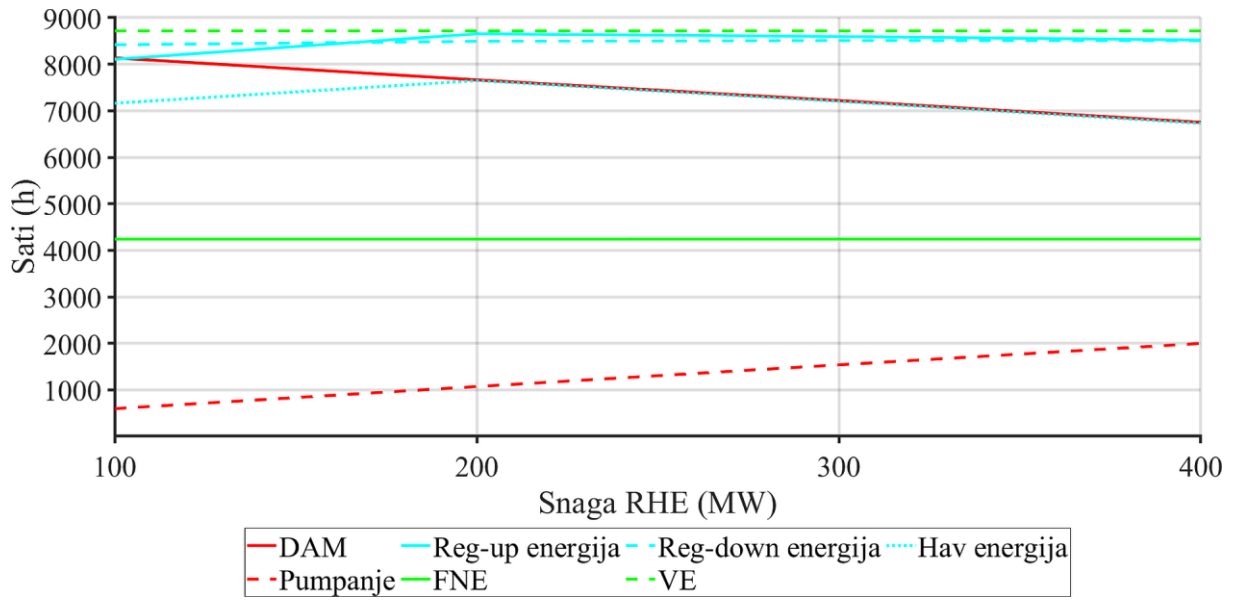
Slika 3.16 Snage pomoćnih usluga baterije u slučaju GENCO-a



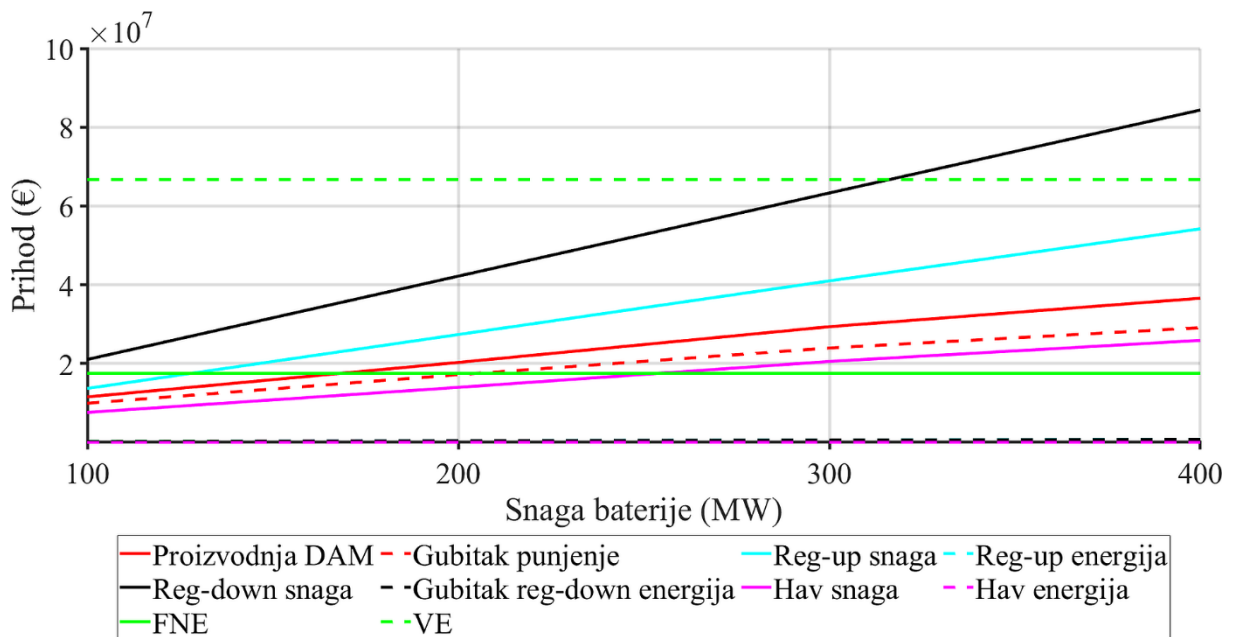
Slika 3.17 Snaga pomoćnih usluga RHE u slučaju GENCO-a



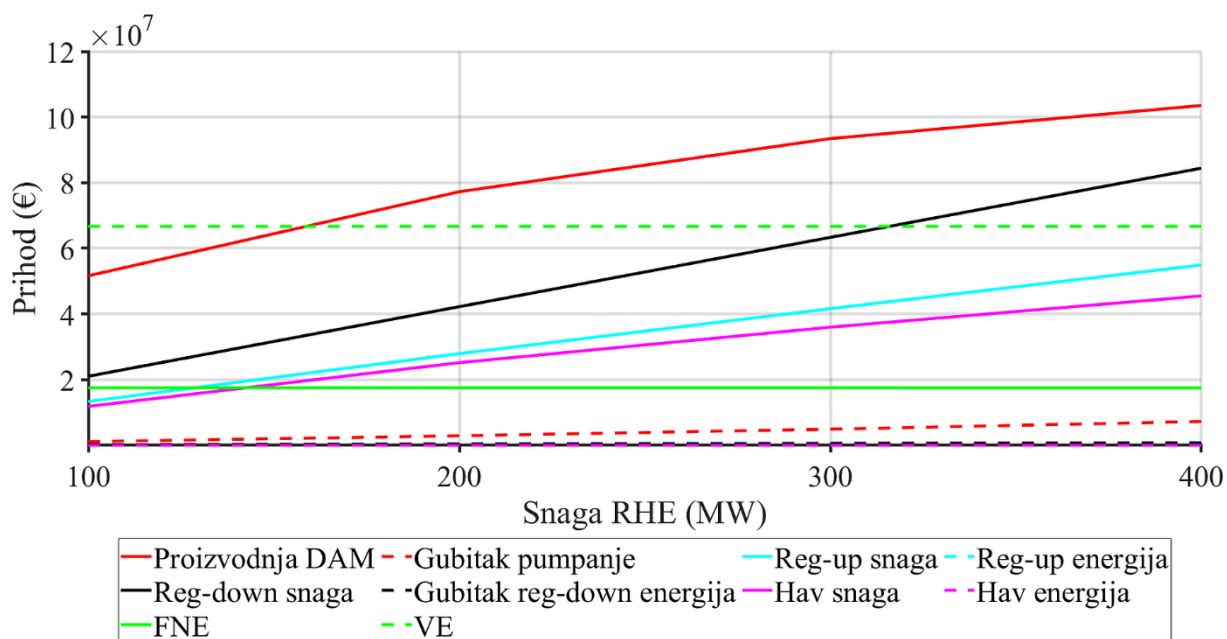
Slika 3.18 Sati rada baterije, FNE i VE u slučaju GENCO-a



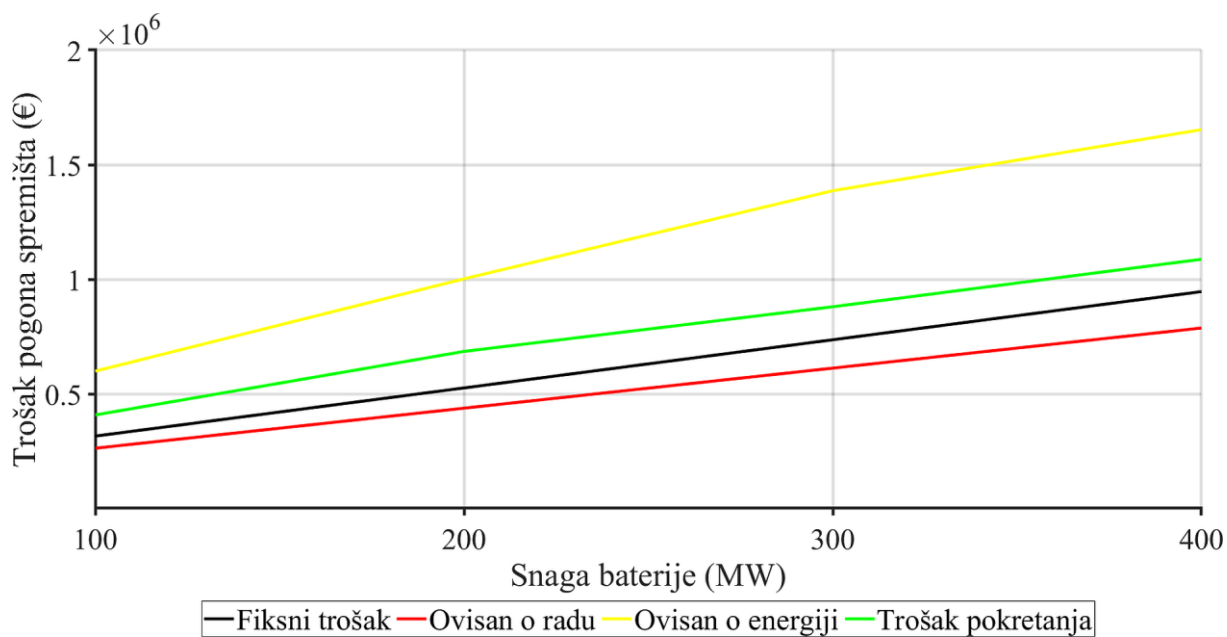
Slika 3.19 Sati rada RHE, FNE i VE u slučaju GENCO-a



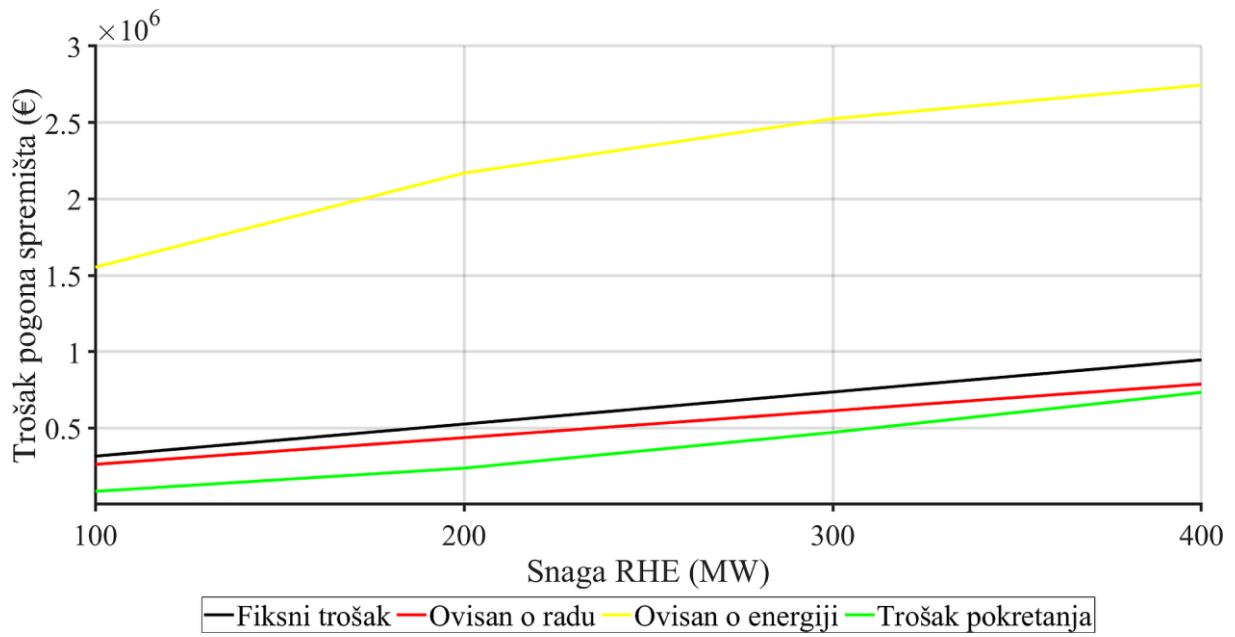
Slika 3.20 Prihodi baterije, FNE i VE u slučaju GENCO-a



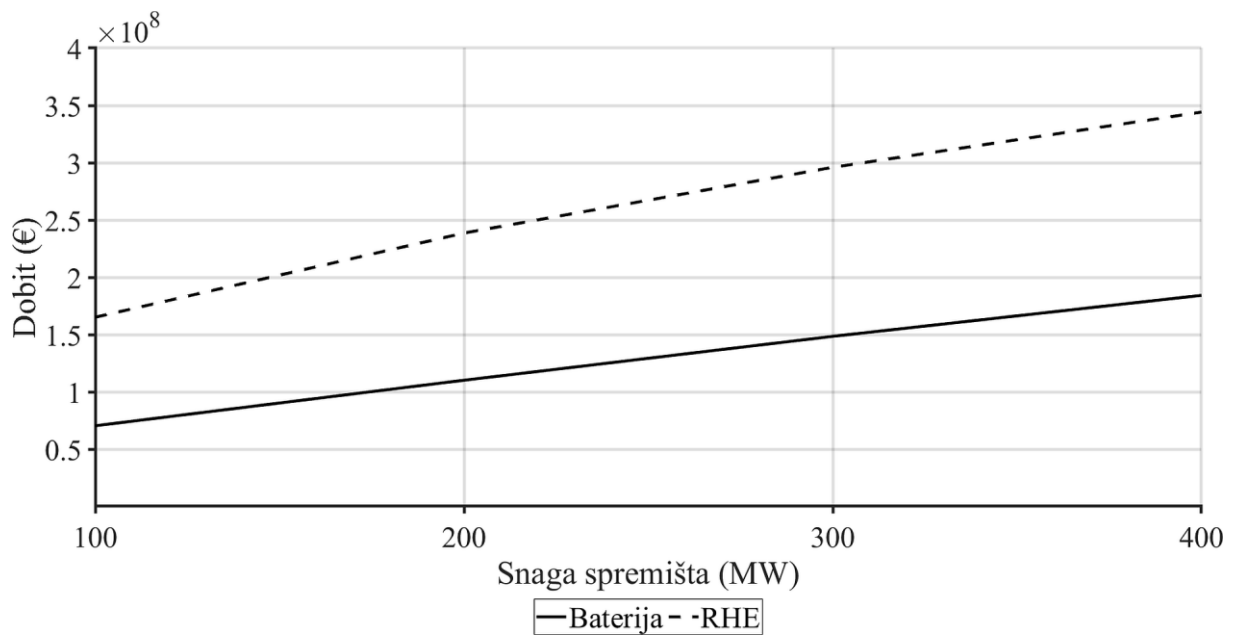
Slika 3.21 Prihodi RHE, FNE i VE u slučaju GENCO-a



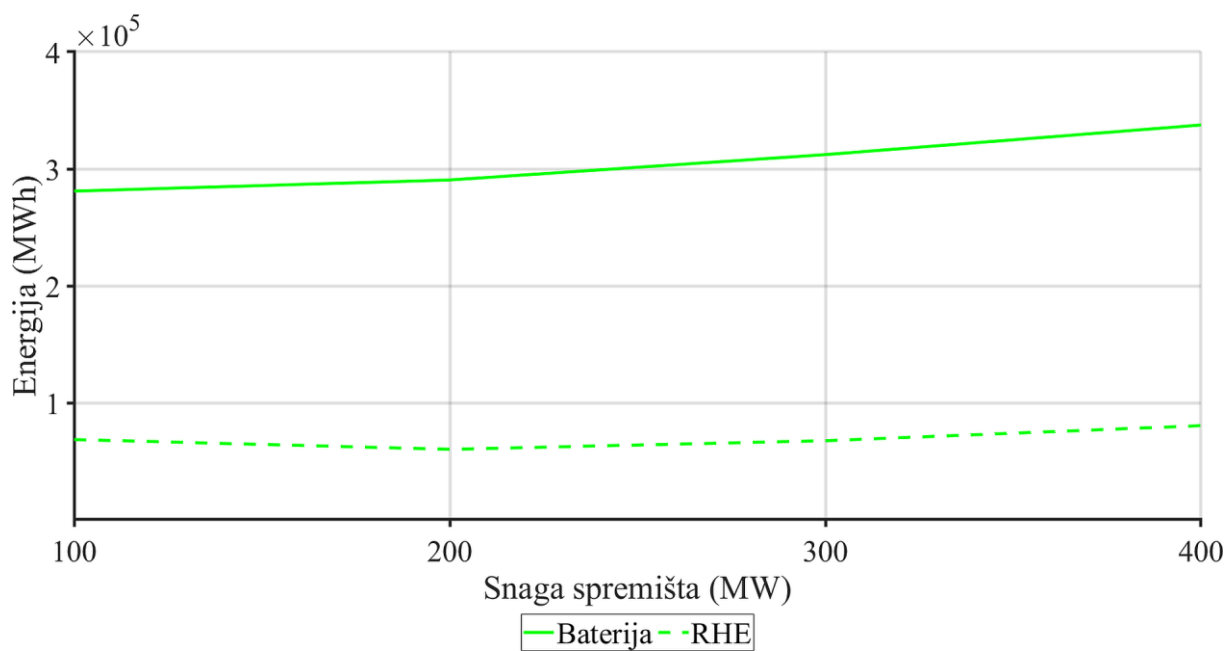
Slika 3.22 Troškovi pogona baterije u slučaju GENCO-a



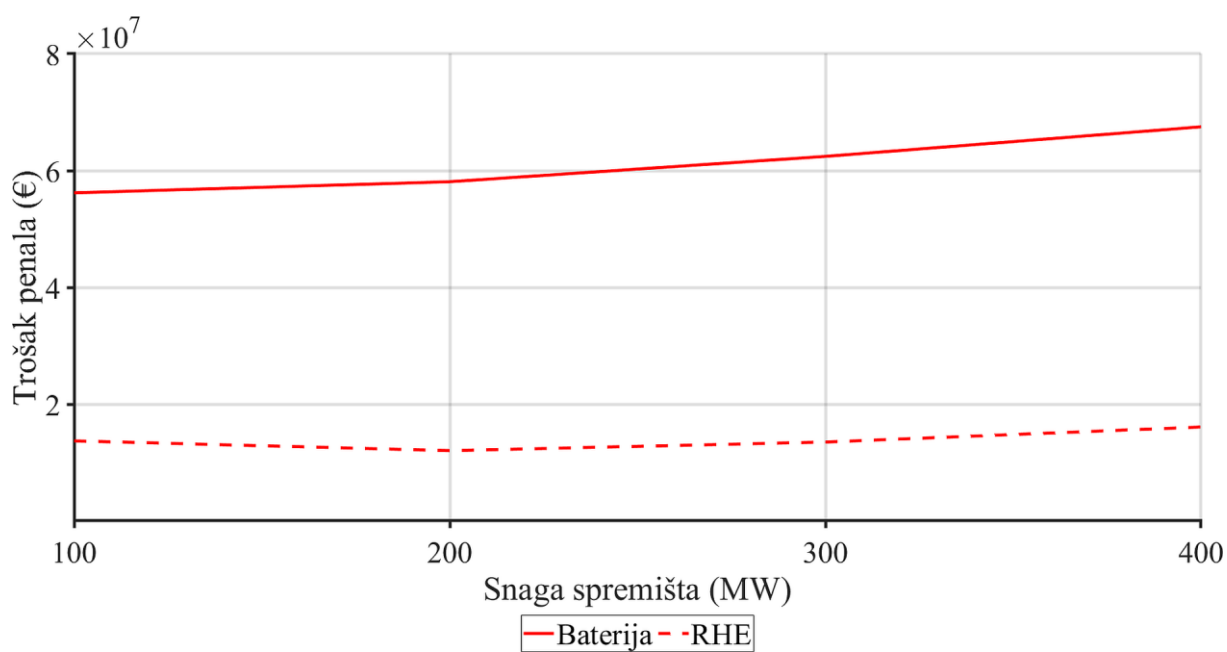
Slika 3.23 Troškovi pogona RHE u slučaju GENCO-a



Slika 3.24 Dobit GENCO-a



Slika 3.25 Energija penala GENCO-a



Slika 3.26 Trošak penala GENCO-a

3.4. Utjecaj veličine spremišta na EES

Utjecaj veličine spremišta na rad cjelokupnog sustava je ispitivan variranjem nekoliko podataka. Za spremište tipa RHE, mijenjala se instalirana snaga u turbinskom i pumpnom režimu, dotoci u gornju i donju akumulaciju te kapacitet gornje i donje akumulacije spremišta. Paralelno s povećanjem snage, povećavani su i troškovi ovisni o veličini spremišta (k_1 , k_2 i k_4 iz tablice 3.1), ali tako da u svakom koraku od 100 MW navedeni troškovi porastu za 40%, dok se troškovi ovisni o proizvedenoj energiji (k_3) te troškovi zaustavljanja (k_5) nisu mijenjali. Tablica 3.16 prikazuje korištene vrijednosti spomenutih parametara za svaku simulaciju.

Tablica 3.16 Parametri RHE koji se mijenjaju u simulaciji u slučaju povećanja veličine spremišta

Snaga RHE (MW)	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$i_{n,t}$, $id_{n,t}$ (rel.)	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$s_{n,t}^u$ (10^6 m ³)	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
$s_{n,t}^d$ (10^6 m ³)	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$s_{I,0}$ (10^6 m ³)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$h_{n,t}^u$ (10^6 m ³)	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$p_{n,t}^u$ (10^6 m ³)	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$sd_{n,t}^u$ (10^6 m ³)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$sd_{n,t}^d$ (10^6 m ³)	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$sd_{I,0}$ (10^6 m ³)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$pr_{n,t}^u$ (10^6 m ³)	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$rd_{n,t}^u$ (10^6 m ³)	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
k_1 (€)	0	36	60	84	108	132	156	180	204	228	252
k_2 (€)	0	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210
k_4 (€/pokretanju)	0	300	500	700	900	1100	1300	1500	1700	1900	2100

Kako se promatra rad cjelokupnog sustava, svi članovi u funkciji cilja su aktivni s tim da su penali za neisporučenu električnu energiju jednaki nuli. Rezultati navedenih simulacija su prikazani u tablicama 3.17-3.24 i slikama 3.27-3.35.

Analizom rezultata proračuna uočava se da povećanjem veličine spremišta:

- značajno raste energija arbitraže spremišta, dok su snage i energije za pomoćne usluge približno konstantne (gornje granice snaga pomoćnih usluga su fiksirane kao u tablici 3.1), tablica 3.17 i slika 3.27
- sve TE (parne, plinske i kogeneracijske) primjetno smanjuju svoju proizvodnju, dok proizvodnja OIE (akumulacijske i protočne HE te VE i FNE) zanemarivo variraju, tablica 3.17 i slika 3.28
- sati rada proizvodnje na DAM-u opadaju (a energija raste) što implicira da je prosječna aktivirana snaga sve veća, tablica 3.19

- uvoz (energija i sati) konstantno pada dok izvoz (energija i sati) konstantno raste, tablice 3.17 i 3.18 te slike 3.28 i 3.30
- prihodi i rashodi od arbitraže rastu proporcionalno s proizvedenom, odnosno utrošenom energijom, dok su prihodi pomoćnih usluga približno konstantni (sukladno proizvedenoj energiji), tablica 3.20 te slika 3.31
- prihodi svih TE se smanjuju sukladno smanjenju proizvedene energije, troškovi uvoza padaju, a raste prihod od izvoza, tablica 3.21 i slika 3.32
- sukladno gore navedenom konstantno raste dobit cjelokupnog sustava, tablica 3.22
- snage svih TE (a naročito plinske) i zbroj snaga svih TE u vršnom opterećenju konstantno opadaju što implicira da je potrebno manje instalirane snage u "dodatnim" TE, tablica 3.23 i slika 3.34.

Dakle, povećanjem snage spremišta u sustavu, sustav bolje koristi svoje resurse (smanjuje proizvodnju TE i uvoz, a podiže izvoz). Prihod spremišta sve više se usmjerava na arbitražu, jer su mogućnosti zarade od pomoćnih usluga ograničene. Također, povećanjem snage spremišta smanjuje se potreba za instaliranom snagom na pragu TE.

Međutim, povećanje snage spremišta zahtijeva veće investicijske troškove. Stoga su se samo u ovom primjeru približno izračunali troškovi izgradnje spremišta kako bi se odredila optimalna veličina spremišta u sustavu, tablica 3.24. Troškovi izgradnje RHE izračunati su kao zbroj troškova proporcionalnih nazivnoj snazi postrojenja i troškova proporcionalnih kapacitetu obje akumulacije. U izračunima u ovom primjeru, jedinične cijene energije i skladišnog kapaciteta, koje značajno variraju ovisno o lokalnim uvjetima, preuzete su iz [149] (uključujući inflaciju do 2021.). Iznosi jediničnih cijena su:

- trošak po jedinici nazivne snage – 1.919.400 €/MW
- trošak po jedinici kapaciteta skladištenja – 253.938.226 $\text{€}/(10^6 \cdot \text{m}^3)$

U tablici 3.24 godišnji trošak investicije u RHE se računa kao suma troška snage i troška akumulacija RHE (što zajedno daje ukupnu investiciju u RHE) podijeljena sa periodom povrata investicije (u primjeru je period povrata investicije postavljen na 25 godina). Godišnji prihod RHE se računa iz stavki u tablici 3.20 (prihodi RHE se uzimaju s predznakom +, a troškovi s predznakom -). Iz tablice 3.24 i slike 3.35 se jasno vidi da s povećanjem spremišta prihod od RHE raste sporije od troška investicije, odnosno trošak investicija raste linearno s povećanjem spremišta, dok prihod sve više zaostaje. Dakle, za navedene uvjete (karakteristike sustava, karakteristike spremišta, cijene energija itd.) optimalna veličina izgradnje RHE je između 500 i 600 MW. Što je razina izgrađenosti spremišta manja, investicija u novo spremište je isplativija.

Tablica 3.17 Energije RHE i ostalih proizvođača te snage pomoćnih usluga RHE u slučaju povećanja veličine spremišta

	Energije RHE (MWh)										
Snaga RHE (MW)	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
DAM	0	268.677	631.349	1.020.399	1.396.630	1.769.230	2.135.989	2.494.731	2.845.652	3.198.207	3.545.717
Reg-up	0	101.555	105.039	106.233	107.045	107.614	108.219	108.505	108.784	109.143	109.485
Reg-down	0	62.155	62.192	62.264	62.328	62.384	62.440	62.430	62.410	62.436	62.453
Havarijska	0	1.358	1.436	1.469	1.486	1.500	1.512	1.532	1.555	1.574	1.596
Pumpanje	0	38.154	105.922	209.497	296.197	377.553	451.420	514.909	568.856	624.722	675.043
	Energije ostalih proizvođača (MWh)										
Snaga RHE	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Parna TE	2.544.005	2.535.301	2.523.689	2.512.334	2.498.239	2.470.174	2.449.750	2.413.600	2.369.362	2.336.255	2.310.515
Plinska TE	2.334.319	2.301.774	2.263.903	2.222.620	2.168.402	2.109.360	2.054.538	2.001.031	1.944.476	1.887.737	1.832.561
TE-TO	1.659.203	1.653.100	1.645.781	1.634.080	1.625.962	1.616.949	1.593.807	1.571.802	1.563.544	1.539.464	1.510.544
Protočna HE	3.033.936	3.033.953	3.033.993	3.033.993	3.033.993	3.033.993	3.033.993	3.034.293	3.034.293	3.034.774	3.034.273
Akumulacijska HE	1.727.146	1.727.070	1.727.123	1.727.179	1.727.314	1.727.377	1.727.697	1.727.616	1.727.616	1.727.406	1.727.206
FNE	844.070	844.070	844.070	844.070	844.070	844.070	844.070	844.070	844.070	844.070	844.070
VE	2.677.678	2.677.678	2.677.678	2.677.678	2.677.678	2.677.678	2.677.768	2.677.735	2.677.926	2.677.678	2.677.864
Uvoz	3.509.911	3.299.548	3.086.497	2.897.878	2.735.411	2.595.836	2.476.647	2.373.474	2.280.465	2.204.161	2.136.602
Izvoz	177.501	191.007	219.677	253.406	304.938	361.076	437.362	518.284	613.710	720.544	840.170
Preljev RHE	682.714	79.057	116.774	159.289	201.441	243.085	284.498	325.860	367.451	408.878	451.075
Preljev akumulacijske HE	21.026	21.103	21.050	20.994	20.858	20.796	20.476	20.557	20.557	20.767	20.967
	Snage pomoćnih usluga RHE (MW)										
Snaga RHE	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Reg-up	0	313.268	324.638	329.252	332.491	334.657	336.781	338.303	339.541	341.007	342.964
Reg-down	0	257.370	257.974	258.660	259.183	259.555	259.818	259.766	259.789	259.925	259.990
Havarijska	0	56.538	59.877	61.097	61.965	62.591	63.227	63.923	64.906	65.615	66.797

Tablica 3.18 Sati rada RHE i ostalih proizvođača u slučaju povećanja veličine spremišta

	Sati rada RHE (h)										
Snaga RHE (MW)	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Mirovanje	8.760	7	24	23	21	24	24	26	26	24	23
DAM	0	7.008	6.810	6.766	6.737	6.712	6.696	6.698	6.748	6.766	6.804
Reg-up snaga	0	7.962	8.139	8.251	8.328	8.380	8.429	8.467	8.495	8.532	8.580
Reg-up energija	0	7.962	8.139	8.251	8.328	8.380	8.429	8.467	8.495	8.532	8.580
Reg-down snaga	0	8.587	8.601	8.623	8.643	8.652	8.661	8.660	8.664	8.666	8.670
Reg-down energija	0	8.395	8.404	8.425	8.445	8.454	8.463	8.461	8.465	8.467	8.471
Havarijska snaga	0	5.673	6.002	6.123	6.208	6.273	6.328	6.402	6.498	6.573	6.686
Havarijska energija	0	5.673	6.002	6.123	6.208	6.273	6.328	6.402	6.498	6.573	6.686
Pumpanje	0	1.745	1.926	1.971	2.002	2.024	2.040	2.036	1.986	1.970	1.933
Preljev RHE	0	252	199	183	191	200	194	193	218	207	199
	Sati rada ostalih proizvođača (h)										
Snaga RHE (MW)	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Parna TE	8.668	8.667	8.642	8.623	8.568	8.545	8.490	8.285	8.187	8.087	7.974
Plinska TE	8.361	8.247	8.176	8.087	7.960	7.836	7.661	7.550	7.277	7.100	6.879
TE-TO	8.760	8.760	8.760	8.760	8.760	8.760	8.760	8.760	8.760	8.760	8.760
Protočna HE	8.719	8.719	8.719	8.719	8.719	8.719	8.719	8.723	8.723	8.730	8.723
Akumulacijska HE	8.719	8.719	8.719	8.719	8.725	8.729	8.746	8.746	8.746	8.746	8.746
Preljev akumulacijske HE	77	77	74	74	74	74	76	75	76	75	76
FNE	4.220	4.220	4.220	4.220	4.220	4.220	4.220	4.220	4.220	4.220	4.220
VE	8.682	8.682	8.682	8.682	8.682	8.682	8.683	8.683	8.684	8.682	8.684
Uvoz	6.581	6.297	5.957	5.577	5.203	4.819	4.443	4.098	3.789	3.427	3.152
Izvoz	755	806	864	952	1.072	1.183	1.301	1.424	1.565	1.684	1.835

Tablica 3.19 Angažirana snaga RHE (%) u slučaju povećanja veličine spremišta

Snaga RHE (MW)	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
0,1-50 MW	-	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50,1-100 MW	-	79	35	27	0	0	0	0	0	0	0
100,1-150 MW	-	0	6	7	29	26	15	0	0	0	0
150,1-200 MW	-	0	59	3	4	3	11	24	20	0	0
200,1-250 MW	-	0	0	3	2	4	3	3	5	22	21
250,1-300 MW	-	0	0	60	4	2	4	3	3	3	3
300,1-350 MW	-	0	0	0	6	4	2	2	5	2	2
350,1-400 MW	-	0	0	0	55	2	5	2	2	5	2
400,1-450 MW	-	0	0	0	0	6	2	4	2	2	5
450,1-500 MW	-	0	0	0	0	53	4	3	3	2	3
500,1-550 MW	-	0	0	0	0	0	3	3	2	2	2
550,1-600 MW	-	0	0	0	0	0	51	5	2	5	2
600,1-650 MW	-	0	0	0	0	0	0	3	2	2	5
650,1-700 MW	-	0	0	0	0	0	0	48	5	2	2
700,1-750 MW	-	0	0	0	0	0	0	0	3	4	2
750,1-800 MW	-	0	0	0	0	0	0	0	46	3	2
800,1-850 MW	-	0	0	0	0	0	0	0	0	3	5
850,1-900 MW	-	0	0	0	0	0	0	0	0	43	2
900,1-950 MW	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
950,1-1000 MW	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40

Tablica 3.20 Prihodi i troškovi pogona RHE u slučaju povećanja veličine spremišta

		Prihodi (€)									
Snaga RHE (MW)	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
DAM	0	35.139.159	83.703.578	136.203.061	187.187.534	237.568.257	286.737.524	334.680.896	381.750.924	428.973.505	475.203.245
Gubitak pumpanja	0	3.236.013	8.667.647	17.048.698	24.070.259	30.689.714	36.439.320	41.220.130	45.456.732	49.811.533	53.796.837
Reg-up snaga	0	48.506.127	50.679.846	51.619.235	52.305.028	52.805.859	53.296.654	53.810.087	54.124.973	54.561.117	55.169.357
Reg-up energija	0	812.440	840.313	849.868	856.363	860.915	865.749	868.043	870.274	873.146	875.878
Reg-down snaga	0	41.881.658	41.981.526	42.054.291	42.138.315	42.182.562	42.197.285	42.196.137	42.201.627	42.208.812	42.212.341
Gubitak reg-down energija	0	372.929	373.151	373.584	373.970	374.307	374.643	374.578	374.461	374.616	374.720
Hav snaga	0	8.497.798	9.358.746	9.731.192	9.947.640	10.139.871	10.319.514	10.512.430	10.673.260	10.852.996	11.169.471
Hav energija	0	10.868	11.489	11.755	11.889	12.001	12.099	12.259	12.436	12.592	12.772
		Troškovi pogona (€)									
Snaga RHE (MW)	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Fiksni trošak	0	315.360	525.600	735.840	946.080	1.156.320	1.366.560	1.576.800	1.787.040	1.997.280	2.207.520
Ovisan o radu	0	262.590	436.800	611.590	786.510	960.960	1.135.680	1.310.100	1.484.780	1.659.840	1.834.770
Ovisan o energiji	0	1.188.757	2.672.916	4.361.642	5.947.481	7.501.815	9.010.670	10.455.786	11.841.536	13.239.541	14.601.306
Trošak pokretanja	0	206.700	336.500	468.300	587.700	727.100	843.700	976.500	1.048.900	1.168.500	1.266.300

Tablica 3.21 Prihodi, trošak rada i trošak pokretanja ostalih proizvođača u slučaju povećanja veličine spremišta

Prihod (€)											
Snaga RHE (MW)	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Parna TE	299.388.365	298.975.666	298.422.923	297.866.939	297.140.958	295.490.309	294.344.448	292.208.774	289.286.655	287.242.950	285.581.224
Plinska TE	289.042.848	287.173.091	284.808.123	282.118.121	278.607.924	274.784.909	271.176.883	267.670.218	264.065.854	260.312.473	256.669.289
TE-TO	197.542.680	197.197.849	196.794.301	196.149.919	195.613.626	195.006.143	193.577.349	192.103.379	191.606.068	190.051.498	188.318.705
Protočna HE	342.018.002	342.018.020	342.018.060	342.018.060	342.018.060	342.018.060	342.018.060	342.015.754	342.015.754	342.009.500	342.015.734
Akumul. HE	216.159.671	216.015.790	215.866.607	215.711.307	215.498.619	215.256.834	214.844.239	214.433.414	214.190.646	213.887.717	213.715.693
FNE	87.585.235	87.585.235	87.585.235	87.585.235	87.585.235	87.585.235	87.585.235	87.585.235	87.585.235	87.585.235	87.585.235
VE	333.730.216	333.730.216	333.730.216	333.730.216	333.730.216	333.730.216	333.729.320	333.729.643	333.729.126	333.730.216	333.729.921
Gubitak uvoz	558.948.074	519.505.439	475.983.607	434.397.466	397.650.416	365.160.721	336.628.206	312.029.478	290.502.588	271.564.092	255.566.777
Izvoz	17.876.262	20.215.216	24.840.580	30.599.637	38.160.465	46.928.999	57.397.924	69.148.869	82.483.384	96.971.231	112.943.499
Troškovi rada (€)											
Snaga RHE (MW)	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Parna TE	127.200.252	126.765.032	126.184.464	125.616.713	124.911.949	123.508.681	122.487.499	120.679.977	118.468.082	116.812.732	115.525.758
Plinska TE	175.073.909	172.633.072	169.792.688	166.696.530	162.630.135	158.202.035	154.090.350	150.077.340	145.835.729	141.580.292	137.442.099
TE-TO	107.848.186	107.451.528	106.975.768	106.215.191	105.687.512	105.101.655	103.597.440	102.167.147	101.630.382	100.065.161	98.185.346
Protočna HE	3.033.936	3.033.953	3.033.993	3.033.993	3.033.993	3.033.993	3.033.993	3.034.293	3.034.293	3.034.774	3.034.273
Akumul. HE	3.454.293	3.454.139	3.454.246	3.454.357	3.454.629	3.454.754	3.455.394	3.455.232	3.455.232	3.454.812	3.454.412
Troškovi pokretanja (€)											
Snaga RHE (MW)	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Parna TE	1.120.000	1.190.000	1.330.000	1.470.000	1.680.000	2.100.000	2.240.000	2.520.000	2.450.000	2.660.000	2.660.000
Plinska TE	1.590.000	1.750.000	1.910.000	2.110.000	2.240.000	2.260.000	2.210.000	2.140.000	1.980.000	1.870.000	1.660.000
TE-TO	480.000	500.000	540.000	500.000	540.000	600.000	660.000	660.000	720.000	640.000	660.000
Protočna HE	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	13.300	13.300	12.600	13.300
Akumul. HE	797.000	791.500	769.000	755.000	738.000	709.000	672.000	638.000	613.000	594.000	576.500

Tablica 3.22 Dobit cjelokupnog sustava (€) u slučaju povećanja veličine spremišta

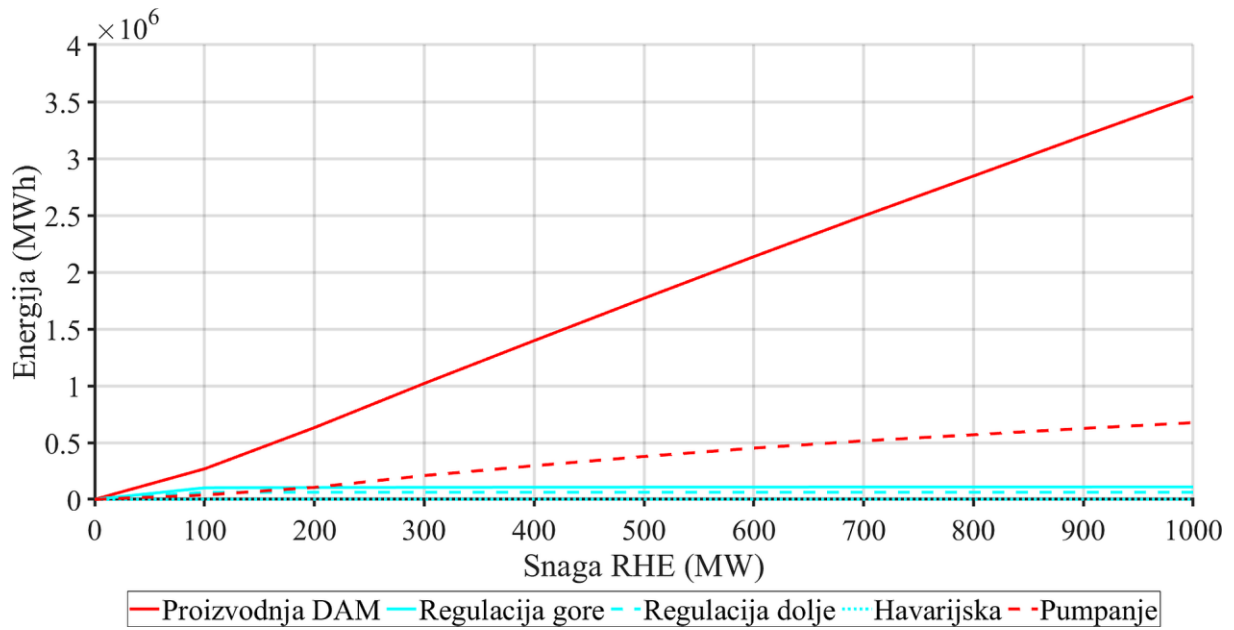
Snaga RHE (MW)	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Dobit	778.246.111	946.209.243	1.032.154.618	1.114.672.164	1.190.994.287	1.261.773.687	1.327.845.793	1.388.862.379	1.446.066.756	1.500.202.887	1.550.994.591

Tablica 3.23 Suma vršnih snaga (MW) svih proizvođača u slučaju povećanja veličine spremišta

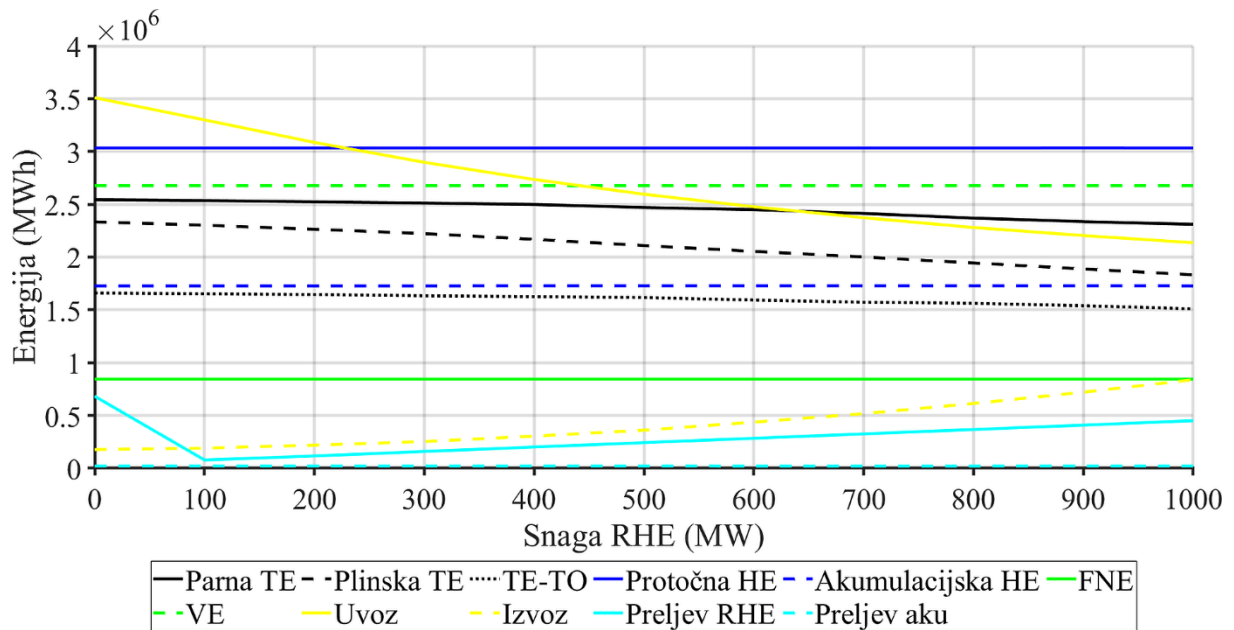
Snaga RHE (MW)	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
RHE	0	16.659	40.178	64.623	88.432	111.966	135.478	159.686	180.981	203.568	224.517
Parna TE	107.430	107.127	106.640	106.162	105.480	104.421	103.752	102.150	99.883	98.621	97.648
Plinska TE	104.964	104.449	103.168	101.743	99.952	98.165	95.244	92.747	89.626	86.743	83.499
TE-TO	71.363	71.345	71.030	70.341	70.046	69.686	68.770	67.772	67.617	66.243	65.148
Protočna HE	126.700	126.700	126.700	126.700	126.700	126.700	126.700	126.700	126.700	126.775	126.700
Akumul. HE	109.126	109.065	110.029	110.880	110.046	109.206	108.422	106.705	106.027	105.117	103.418
Uvoz	219.853	204.665	182.810	161.444	142.950	125.553	110.075	96.415	84.737	73.218	64.155
Izvoz	603	865	1.415	2.831	4.515	6.606	9.340	13.078	16.474	21.167	25.968
Zbroj svih TE	283.757	282.922	280.838	278.246	275.478	272.272	267.766	262.669	257.127	251.606	246.295

Tablica 3.24 Analiza troška RHE (€) u slučaju povećanja veličine spremišta

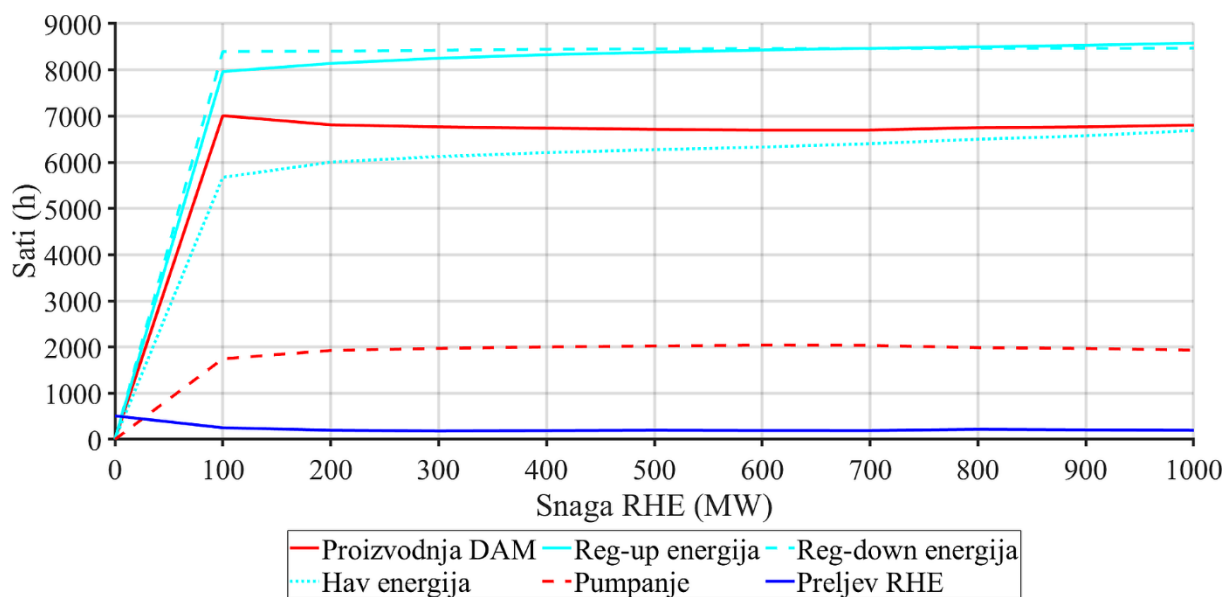
Snaga RHE (MW)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Trošak zbog snage RHE	191.940.000	383.880.000	575.820.000	767.760.000	959.700.000	1.151.640.000	1.343.580.000	1.535.520.000	1.727.460.000	1.919.400.000
Trošak zbog bazena RHE	1.269.691.130	2.539.382.260	3.809.073.390	5.078.764.520	6.348.455.650	7.618.146.780	8.887.837.910	10.157.529.040	11.427.220.170	12.696.911.300
Ukupna investicija u RHE	1.461.631.130	2.923.262.260	4.384.893.390	5.846.524.520	7.308.155.650	8.769.786.780	10.231.417.910	11.693.049.040	13.154.680.170	14.616.311.300
Godišnji trošak investicije	58.465.245	116.930.490	175.395.736	233.860.981	292.326.226	350.791.471	409.256.716	467.721.962	526.187.207	584.652.452
Godišnji prihod RHE	129.265.703	173.562.883	216.869.749	259.734.769	302.159.248	344.258.252	386.165.958	427.640.046	469.230.859	510.561.610
Razlika godišnjeg prihoda	70.800.458	56.632.392	41.474.013	25.873.788	9.833.022	-6.533.219	-23.090.759	-40.081.916	-56.956.348	-74.090.842



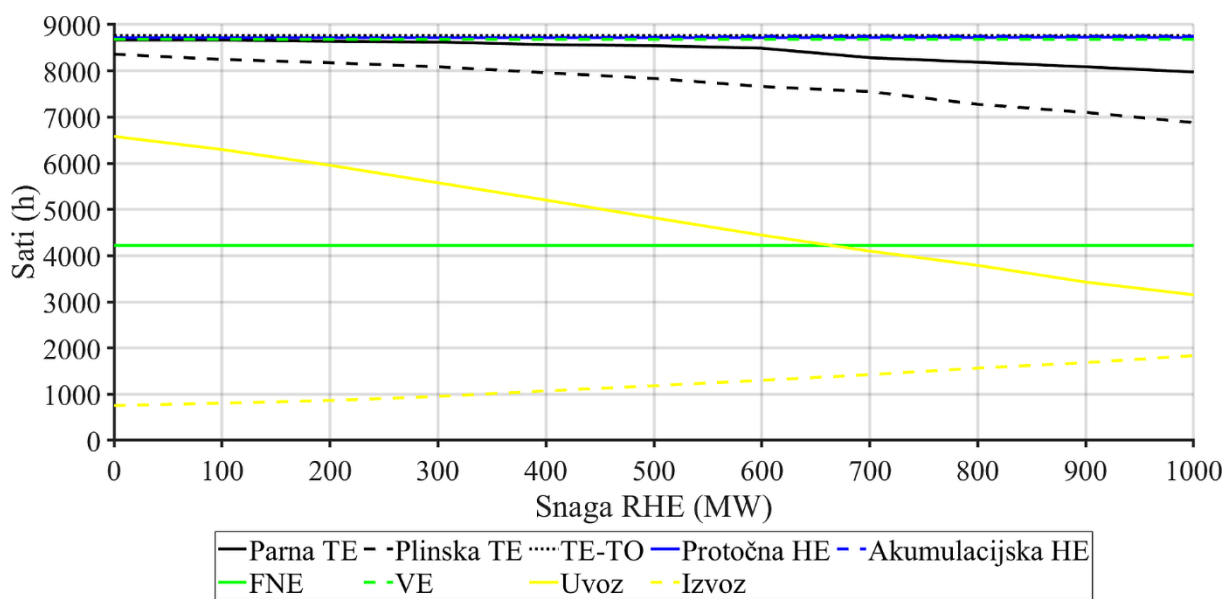
Slika 3.27 Energije RHE u slučaju povećanja veličine spremišta



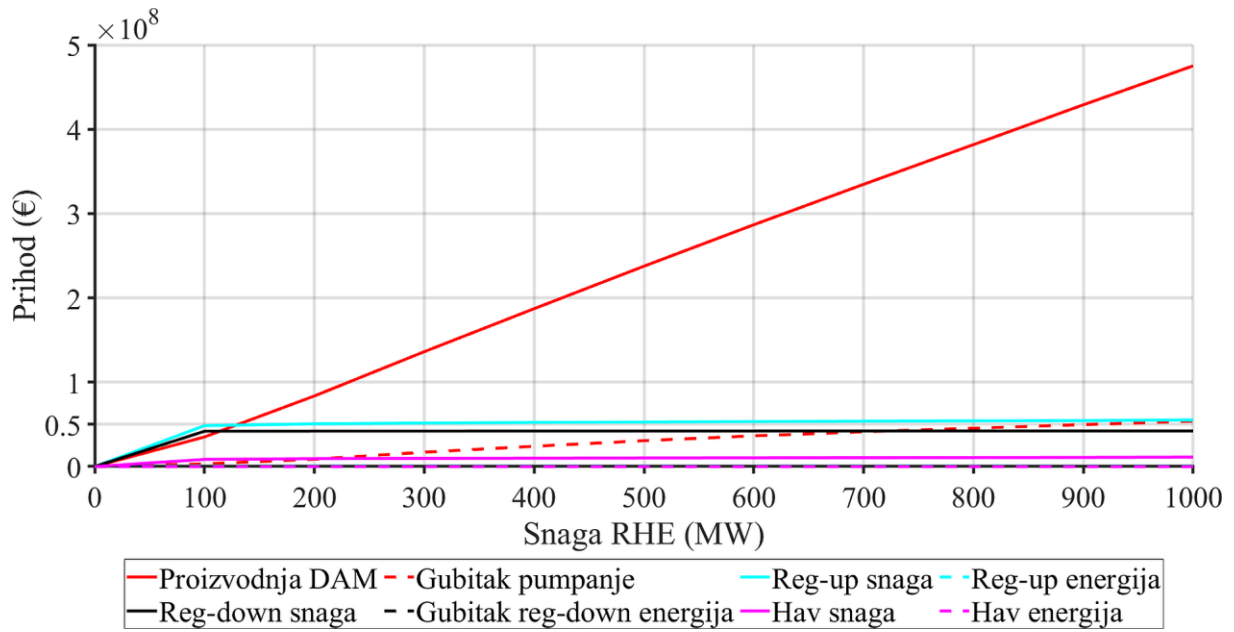
Slika 3.28 Energije ostalih proizvođača u slučaju povećanja veličine spremišta



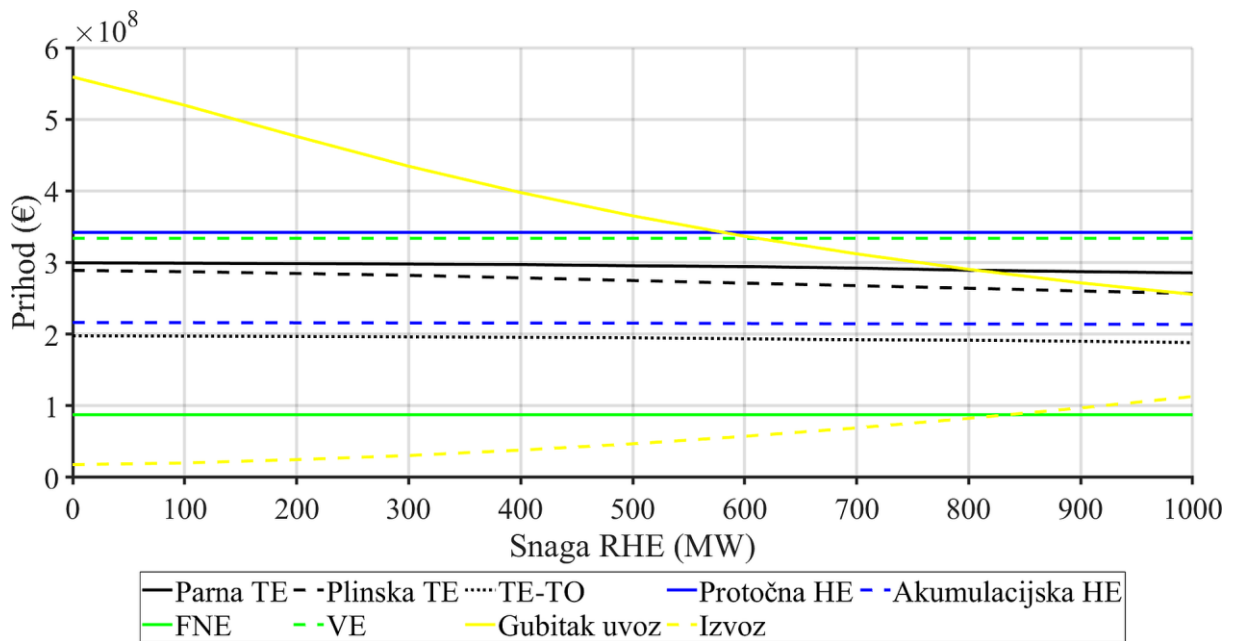
Slika 3.29 Sati rada RHE u slučaju povećanja veličine spremišta



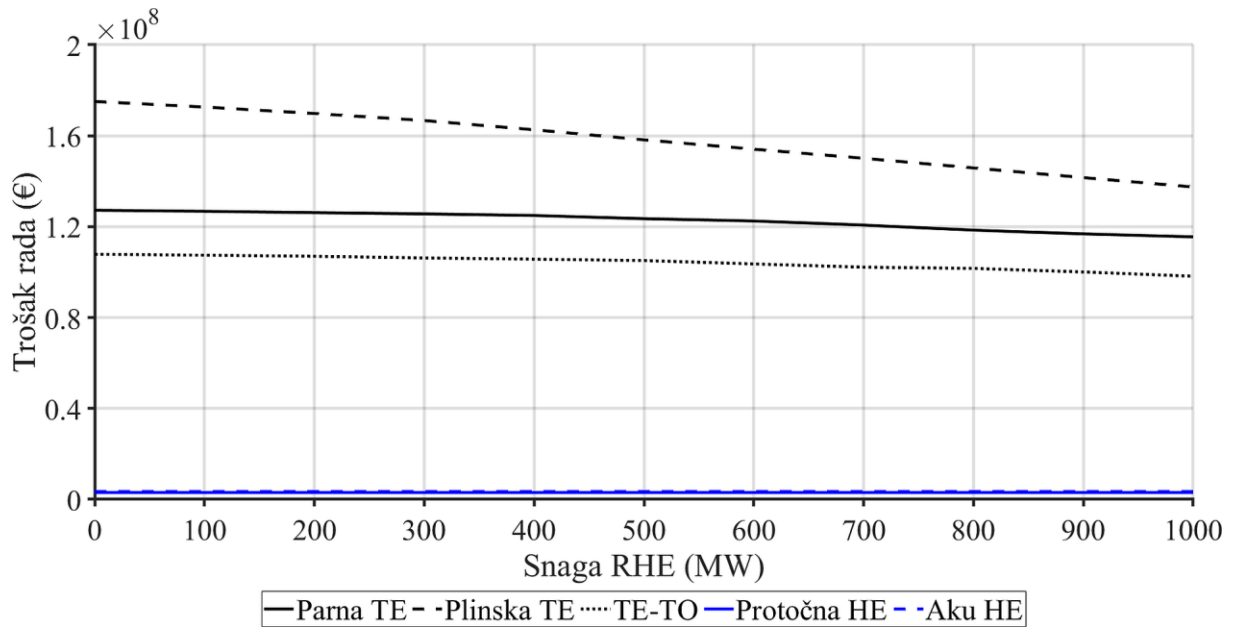
Slika 3.30 Sati rada ostalih proizvođača u slučaju povećanja veličine spremišta



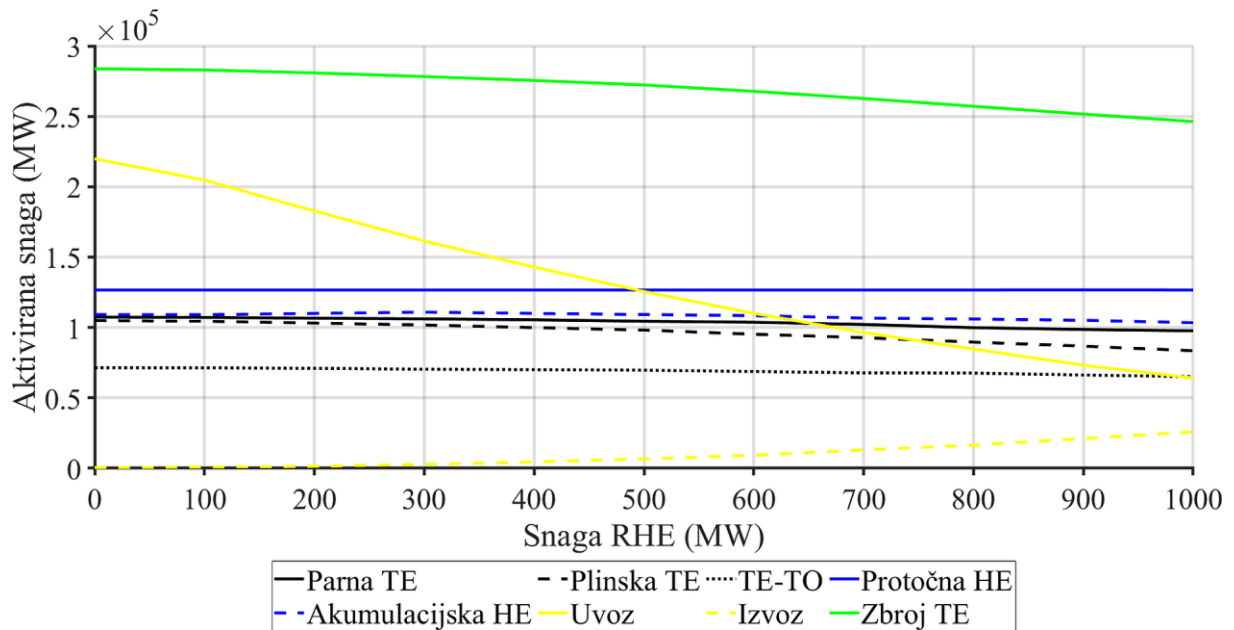
Slika 3.31 Prihodi RHE u slučaju povećanja veličine spremišta



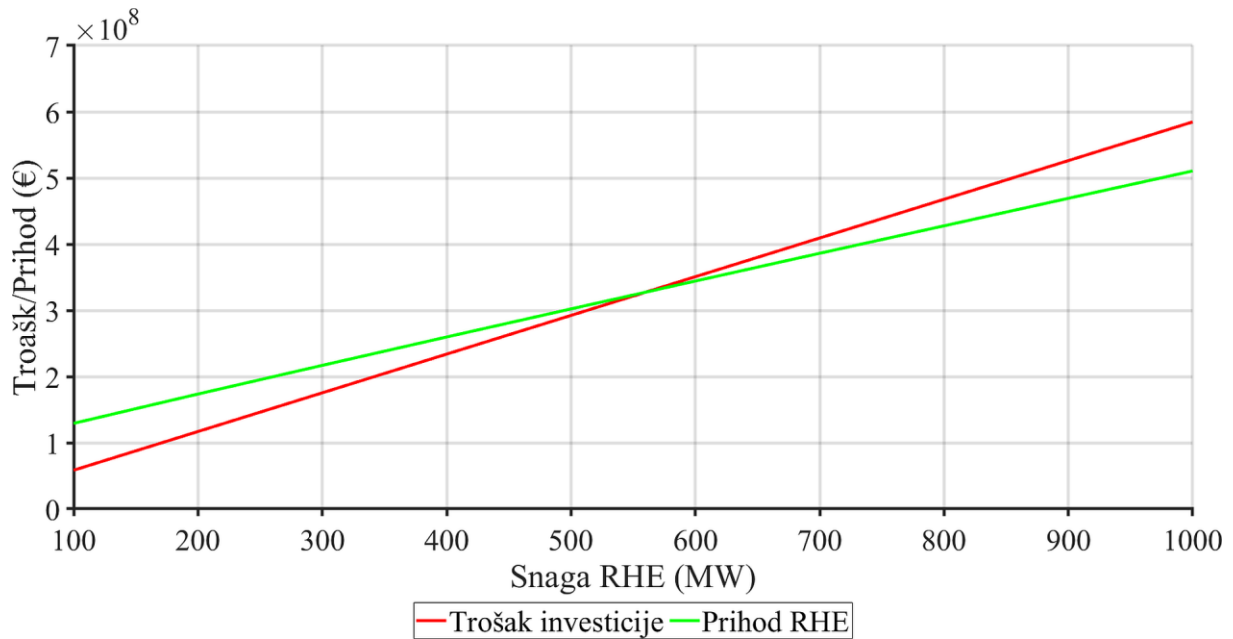
Slika 3.32 Prihodi ostalih proizvođača u slučaju povećanja veličine spremišta



Slika 3.33 Troškovi rada ostalih proizvođača u slučaju povećanja veličine spremišta



Slika 3.34 Suma vršnih snaga svih proizvođača u slučaju povećanja veličine spremišta



Slika 3.35 Analiza troška RHE

3.5. Utjecaj strukture EES-a na rad spremišta

U posljednjoj grupi proračuna, u sustavu s odabranim spremištem od 500 MW (odabran kao optimalni iz poglavlja 3.4 s odgovarajućim vrijednostima parametara iz tablice 3.16) te konstantnim zahtjevima potrošača za energijom, varirali su se udjeli proizvodnje pojedinih raspoloživih izvora energije i promatran je njihov utjecaj na optimalni rad spremišta. Budući da su simulacijama obuhvaćeni svi tipovi proizvodnih jedinica, funkcija cilja uzima u obzir sve članove osim zadnjeg (ne plaćaju se penali za neisporučenu električnu energiju).

Ova ispitivanja su podijeljena u dvije grupe:

- U prvoj grupi simulacija povećavala se proizvodnja akumulacijskih HE prema osnovnom primjeru postupnim povećavanjem snage akumulacijskih HE u sustavu i dotoka vode u njihove bazene, a za približno isti iznos se smanjivala proizvodnja TE smanjivanjem raspoložive snage parnih, plinskih i kogeneracijskih TE.
- U drugoj grupi simulacija povećavala se proizvodnja "neupravljivih" VE i FNE prema osnovnom primjeru postupnim povećavanjem njihove proizvodnje u svakom satu, a za približno isti iznos se smanjivala proizvodnja TE kao i u prethodnim simulacijama.

3.5.1. Povećanje udjela proizvodnje akumulacijske HE

U ovoj grupi simulacija, povećavao se udio proizvodnje akumulacijskih HE. Gornje granice snaga pomoćnih usluga su uzete kao i u osnovnom primjeru. Dotok u akumulaciju ($i_{aku_{n,t}}$) se sa svakih 100 MW promjene snage akumulacijske HE povećavao za 50% vrijednosti dotoka sa slike 3.5 (u osnovnom primjeru je korištena snaga akumulacijske HE 400 MW te vrijednosti dotoka prikazane na slici 3.5 pomnožene s faktorom 1,5). Vrijednosti parametara koji se mijenjaju u ovom slučaju prikazani su u tablici 3.25. Rezultati navedenih simulacija su prikazani u tablicama 3.26-3.31 te grafički na slikama 3.36-3.40.

Tablica 3.25 Parametri sustava koji se mijenjaju u simulacijama u slučaju povećanja udjela proizvodnje akumulacijske HE

Snaga akumulacijske HE (MW)	400	500	600	700	800	900	1000
$aku_{n,t}^u$ (10^6 m ³)	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$i_{aku_{n,t}}$ (rel.)	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
$terpa_{n,t}^u$ (MW)	300	280	260	240	220	200	180
$terpl_{n,t}^u$ (MW)	300	280	260	240	220	200	180
$tertop_{n,t}^u$ (MW)	200	180	160	140	120	100	80
$tertop_{n,t}^l$ (MW)	50	36	32	28	24	20	16
$terpa_snaga_{lagr}$ (MW)	150	140	130	120	110	100	90
$terpl_snaga_{lagr}$ (MW)	100	140	130	120	110	100	90
$tertop_snaga_{lagr}$ (MW)	100	90	80	70	60	50	40
$terpa_teh_min$ (MW)	60	56	52	48	44	40	36
$terpl_teh_min$ (MW)	20	28	26	24	22	20	18
$tertop_teh_min$ (MW)	40	36	32	28	24	20	16

Analizom rezultata proračuna uočava se da postupnim povećavanjem snage akumulacijskih HE u sustavu i dotoka vode u njihove bazene:

- energija spremišta za prodaju na DAM i energija za pumpanje pada, dok energija za usluge blago raste, što znači da se spremište više okreće prodaji pomoćnih usluga nego arbitraži, tablica 3.26 i slika 3.36
- proizvodnja protočnih HE, VE i FNE je konstantna te je njihova ukupna proizvodnja približno konstantna (zasjenjeni redak u tablici 3.26) pored toga što proizvodnja akumulacijskih HE raste, a svih TE pada (jer se smanjuje njihova raspoloživa snaga). Istovremeno, blago rastu uvoz i izvoz te preljevi u RHE, dok preljevi u akumulacijskim HE izrazito rastu. Dakle, povećanu proizvodnju iz akumulacijskih HE se isplati i jeftino izvoziti, tablica 3.26 i slika 3.37
- sati proizvodnje na DAM tržištu rastu, a opada proizvodnja energije što znači da spremište radi češće, ali aktivira manju snagu, tablica 3.27. To se također može

primijetiti u tablici 3.28, gdje se vidi da povećanjem snage akumulacijske HE, raste postotak angažirane snage 100,1-150 MW, opada postotak rada 450,1-500 MW

- sati rada parnih i plinskih TE značajno se smanjuju, dok su sati rada akumulacijske i protočne HE te IOIE konstantni ili približno konstantni. Sati uvoza se smanjuju (uz prethodno rečeno gore da se energija uvoza povećava), što znači da povećanjem snage akumulacijske HE, sustav rjeđe uvozi ali pri tim slučajevima aktivira veću snagu uvoza (prosječna snaga uvoza veća), tablica 3.27 i slika 3.38
- prihod od DAM-a, gubitak zbog pumpanja te trošak pogona ovisan o energiji spremišta opada sukladno energiji, dok su prihodi i rashodi pomoćnih usluga približno konstantni, tablica 3.29.

Ukupno gledajući, s povećanjem udjela hidroenergije naspram energije iz TE prihod spremišta blago opada. S druge strane, prihodi sustava očekivano rastu najviše zbog povećanja proizvodnje iz akumulacijskih HE, uz smanjenje troška najviše radi proizvodnje u TE, tablica 3.30. Ukupno gledajući dobit sustava konstantno raste usprkos smanjenju dobiti RHE, tablica 3.31 i slika 3.40.

Povećanjem udjela upravljive hidroenergije, korištenje spremišta energije i potrošnja energije za pumpanje je sve manje opravdano, jer gotovo uvijek ima dovoljno i snage i energije u akumulacijskim HE za zadovoljenje potrošača u razdobljima skuplje energije. Povećanje udjela akumulacijskih HE u energetsom miksu EES-a zapravo smanjuju potrebu za spremištem energije, odnosno povećanje udjela akumulacijskih HE smanjuje optimalnu veličinu spremišta energije u sustavu.

Tablica 3.26 Energije RHE i ostalih proizvođača te snage pomoćnih usluga RHE u slučaju povećanja udjela proizvodnje akumulacijske HE

	Energije RHE (MWh)						
Snaga akumulacijske HE (MW)	400	500	600	700	800	900	1000
DAM	1.777.241	1.766.758	1.754.324	1.746.104	1.738.857	1.732.899	1.727.748
Reg-up	107.563	107.729	107.999	108.052	108.246	108.206	108.259
Reg-down	62.356	62.362	62.382	62.393	62.381	62.397	62.420
Havarijska	1.501	1.522	1.529	1.548	1.568	1.578	1.591
Pumpanje	381.215	368.700	354.363	344.935	336.933	329.585	323.453
	Energije ostalih proizvođača (MWh)						
Snaga akumulacijske HE (MW)	400	500	600	700	800	900	1000
Parna TE	2.473.584	2.271.759	2.060.914	1.866.523	1.656.692	1.438.873	1.250.153
Plinska TE	2.107.948	1.937.779	1.770.944	1.596.511	1.444.586	1.307.318	1.157.037
TE-TO	1.614.004	1.419.590	1.242.388	1.066.158	892.091	720.682	556.134
Protočna HE	3.033.993	3.033.993	3.033.993	3.033.993	3.033.993	3.033.993	3.033.993
Akumulacijska HE	1.727.366	2.289.462	2.847.474	3.402.765	3.956.409	4.508.242	5.058.543
FNE	844.070	844.070	844.070	844.070	844.070	844.070	844.070
VE	2.677.678	2.677.678	2.677.678	2.677.678	2.677.678	2.677.678	2.677.692
Σ(TE, HE, FNE, VE)	14.478.643	14.474.330	14.477.460	14.487.698	14.505.518	14.530.856	14.577.621
Uvoz	2.593.180	2.642.754	2.701.025	2.764.827	2.836.916	2.912.700	2.987.637
Izvoz	361.790	409.263	472.825	548.134	639.026	741.491	864.217
Preljev RHE	243.759	244.124	245.007	245.778	246.551	246.708	246.962
Preljev akumulacijske HE	20.806	35.765	54.807	76.569	99.980	125.201	151.954
	Snage pomoćnih usluga RHE (MW)						
Snaga akumulacijske HE (MW)	400	500	600	700	800	900	1000
Reg-up	334.470	335.175	336.006	336.527	337.489	337.510	337.831
Reg-down	259.376	259.473	259.555	259.591	259.551	259.673	259.722
Havarijska	62.504	63.539	63.965	64.713	65.570	66.013	66.541

Tablica 3.27 Sati rada RHE i ostalih proizvođača u slučaju povećanja udjela proizvodnje akumulacijske HE

Snaga akumulacijske HE (MW)	Sati rada RHE (h)						
	400	500	600	700	800	900	1000
Mirovanje	29	28	29	29	29	29	29
DAM	6.700	6.769	6.796	6.838	6.893	6.929	6.964
Reg-up snaga	8.375	8.388	8.409	8.424	8.444	8.447	8.453
Reg-up energija	8.375	8.388	8.409	8.424	8.444	8.447	8.453
Reg-down snaga	8.647	8.651	8.652	8.654	8.655	8.657	8.658
Reg-down energija	8.449	8.452	8.452	8.454	8.455	8.457	8.458
Havarijska snaga	6.264	6.360	6.404	6.481	6.567	6.611	6.664
Havarijska energija	6.264	6.360	6.404	6.481	6.567	6.611	6.664
Pumpanje	2.031	1.963	1.935	1.893	1.838	1.802	1.767
Preljev RHE	195	194	180	188	187	191	181
Snaga akumulacijske HE (MW)	Sati rada ostalih proizvođača (h)						
	400	500	600	700	800	900	1000
Parna TE	8.548	8.343	8.170	8.074	7.766	7.408	7.180
Plinska TE	7.845	7.646	7.593	7.368	7.190	7.137	6.897
TE-TO	8.760	8.760	8.760	8.760	8.760	8.760	8.760
Protočna HE	8.719	8.719	8.719	8.719	8.719	8.719	8.719
Akumulacijska HE	8.729	8.741	8.741	8.741	8.741	8.741	8.741
Preljev akumulacijske HE	74	82	90	97	103	106	113
FNE	4.220	4.220	4.220	4.220	4.220	4.220	4.220
VE	8.682	8.682	8.682	8.682	8.682	8.682	8.683
Uvoz	4.814	4.642	4.488	4.293	4.151	4.023	3.900
Izvoz	1.172	1.220	1.316	1.430	1.622	1.774	1.971

Tablica 3.28 Angažirana snaga RHE (%) u slučaju povećanja udjela proizvodnje akumulacijske HE

Snaga akumulacijske HE (MW)	400	500	600	700	800	900	1000
0,1-50 MW	0	0	0	0	0	0	0
50,1-100 MW	0	0	0	0	0	0	0
100,1-150 MW	26	26	27	28	29	30	30
150,1-200 MW	3	3	3	3	3	4	3
200,1-250 MW	4	5	5	5	5	5	5
250,1-300 MW	2	2	2	2	2	2	2
300,1-350 MW	4	4	4	4	4	4	4
350,1-400 MW	2	3	3	2	2	2	3
400,1-450 MW	7	6	6	7	7	6	7
450,1-500 MW	52	51	50	49	48	47	46

Tablica 3.29 Prihodi i troškovi pogona RHE u slučaju povećanja udjela proizvodnje akumulacijske HE

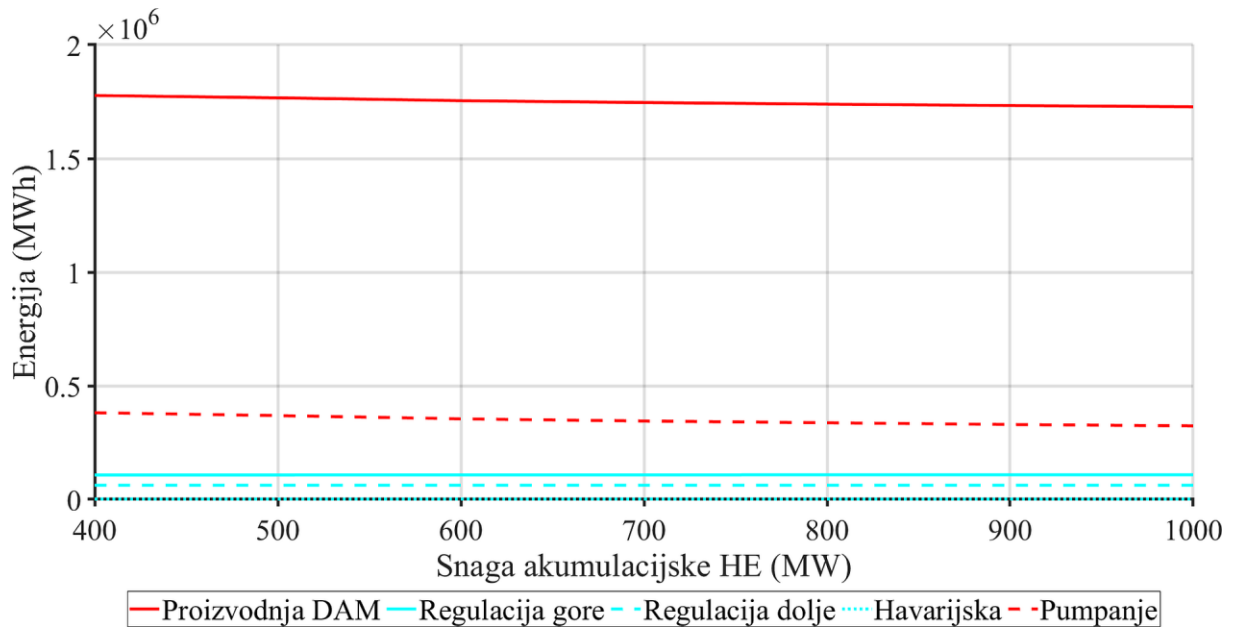
Snaga akumulacijske HE (MW)	Prihodi (€)						
	400	500	600	700	800	900	1000
DAM	238.109.243	236.390.095	234.685.612	233.243.475	231.822.858	230.820.666	230.112.689
Gubitak pumpanja	30.892.961	29.786.328	28.622.015	27.611.724	26.727.942	26.019.542	25.614.122
Reg-up snaga	52.807.727	52.999.497	53.254.631	53.409.832	53.668.167	53.737.933	53.831.767
Reg-up energija	860.507	861.829	863.993	864.420	865.971	865.649	866.070
Reg-down snaga	42.181.381	42.183.584	42.189.156	42.191.062	42.189.676	42.197.496	42.198.876
Gubitak reg-down energija	374.137	374.174	374.292	374.361	374.283	374.379	374.518
Hav snaga	10.136.836	10.298.585	10.430.481	10.553.276	10.732.722	10.828.722	10.915.810
Hav energija	12.008	12.179	12.229	12.388	12.543	12.623	12.730
Snaga akumulacijske HE (MW)	Troškovi pogona (€)						
	400	500	600	700	800	900	1000
Fiksni trošak	1.156.320	1.156.320	1.156.320	1.156.320	1.156.320	1.156.320	1.156.320
Ovisan o radu	960.410	960.520	960.410	960.410	960.410	960.410	960.410
Ovisan o energiji	7.541.662	7.463.625	7.372.948	7.312.802	7.261.424	7.215.760	7.177.321
Trošak pokretanja	718.300	707.300	687.500	675.400	655.600	638.000	636.900

Tablica 3.30 Prihodi, trošak rada i trošak pokretanja ostalih proizvođača u slučaju povećanja udjela proizvodnje akumulacijske HE

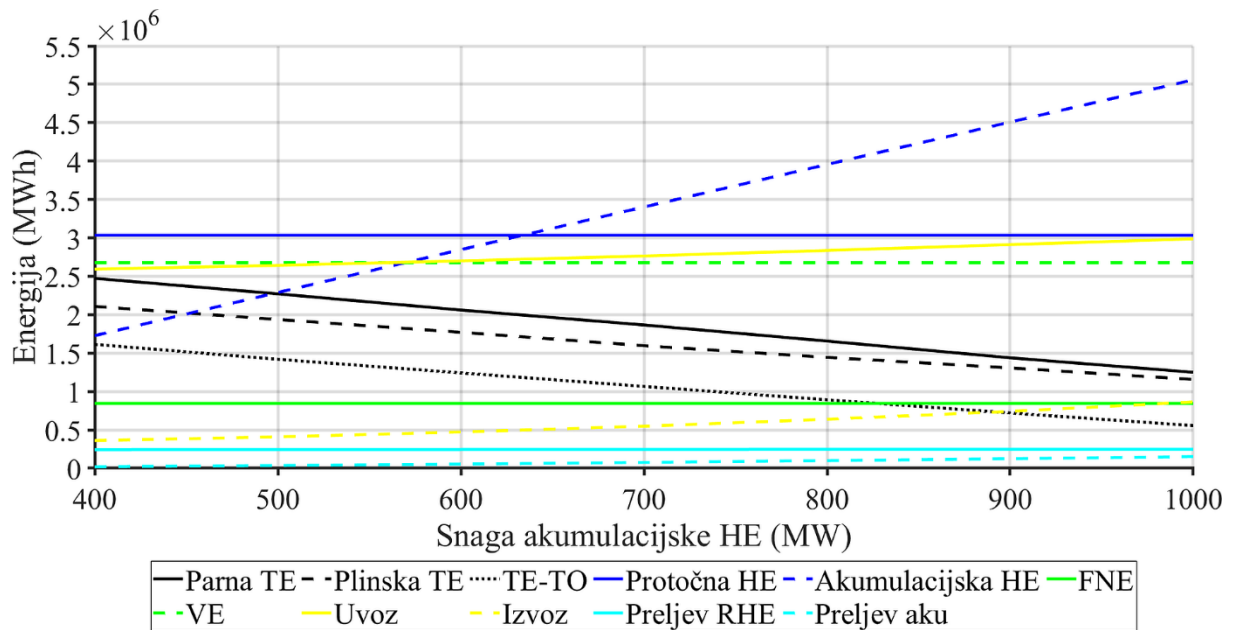
Snaga akumulacijske HE (MW)	Prihod (€)						
	400	500	600	700	800	900	1000
Parna TE	295.629.544	273.966.982	251.423.102	229.919.310	207.395.876	184.427.459	163.246.825
Plinska TE	274.631.770	254.557.923	234.666.045	214.394.514	195.299.622	177.166.148	158.133.116
TE-TO	194.879.135	173.471.249	153.003.479	132.525.581	112.360.854	92.200.688	72.532.730
Protočna HE	342.018.060	342.018.060	342.018.060	342.018.060	342.018.060	342.018.060	342.018.060
Akumulacijska HE	215.211.765	283.609.252	351.289.112	418.288.132	485.313.679	551.812.341	618.179.607
FNE	87.585.235	87.585.235	87.585.235	87.585.235	87.585.235	87.585.235	87.585.235
VE	333.730.216	333.730.216	333.730.216	333.730.216	333.730.216	333.730.216	333.729.973
Gubitak uvoz	365.038.973	368.538.273	374.072.059	380.733.679	388.688.809	397.565.263	406.855.246
Izvoz	46.970.515	52.125.551	58.102.892	64.718.907	72.320.620	80.567.428	89.903.490
Snaga akumulacijske HE (MW)	Troškovi rada (€)						
	400	500	600	700	800	900	1000
Parna TE	123.679.183	113.587.925	103.045.684	93.326.163	82.834.605	71.943.670	62.507.669
Plinska TE	158.096.078	145.333.390	132.820.820	119.738.331	108.343.959	98.048.824	86.777.788
TE-TO	104.910.288	92.273.352	80.755.206	69.300.276	57.985.915	46.844.351	36.148.686
Protočna HE	3.033.993	3.033.993	3.033.993	3.033.993	3.033.993	3.033.993	3.033.993
Akumulacijska HE	3.454.733	4.578.924	5.694.947	6.805.531	7.912.817	9.016.483	10.117.085
Snaga akumulacijske HE (MW)	Troškovi pokretanja (€)						
	400	500	600	700	800	900	1000
Parna TE	2.100.000	2.380.000	2.590.000	2.800.000	3.010.000	3.010.000	2.800.000
Plinska TE	2.220.000	1.620.000	1.580.000	1.660.000	1.560.000	1.450.000	1.320.000
TE-TO	640.000	640.000	700.000	720.000	780.000	560.000	500.000
Protočna HE	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000
Akumulacijska HE	709.000	904.000	1.095.500	1.277.500	1.441.500	1.625.500	1.802.500

Tablica 3.31 Dobit cjelokupnog sustava (€) u slučaju povećanja udjela proizvodnje akumulacijske HE

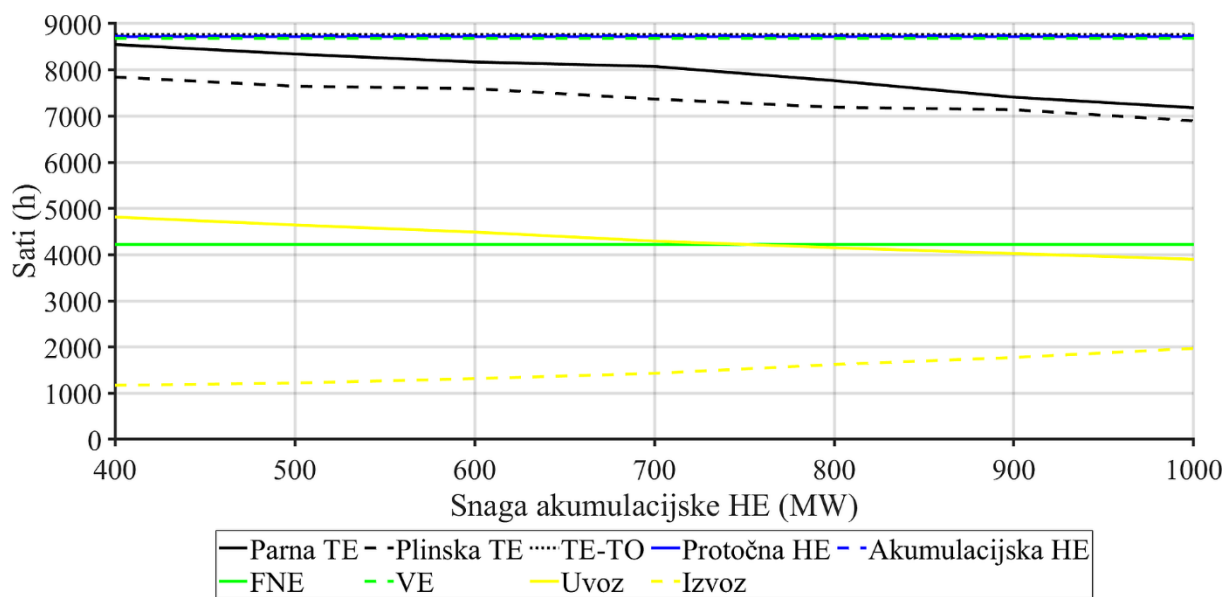
Snaga akumulacijske HE (MW)	400	500	600	700	800	900	1000
Dobit	1.262.123.168	1.295.993.040	1.325.674.417	1.353.498.333	1.379.259.350	1.403.397.842	1.427.036.862



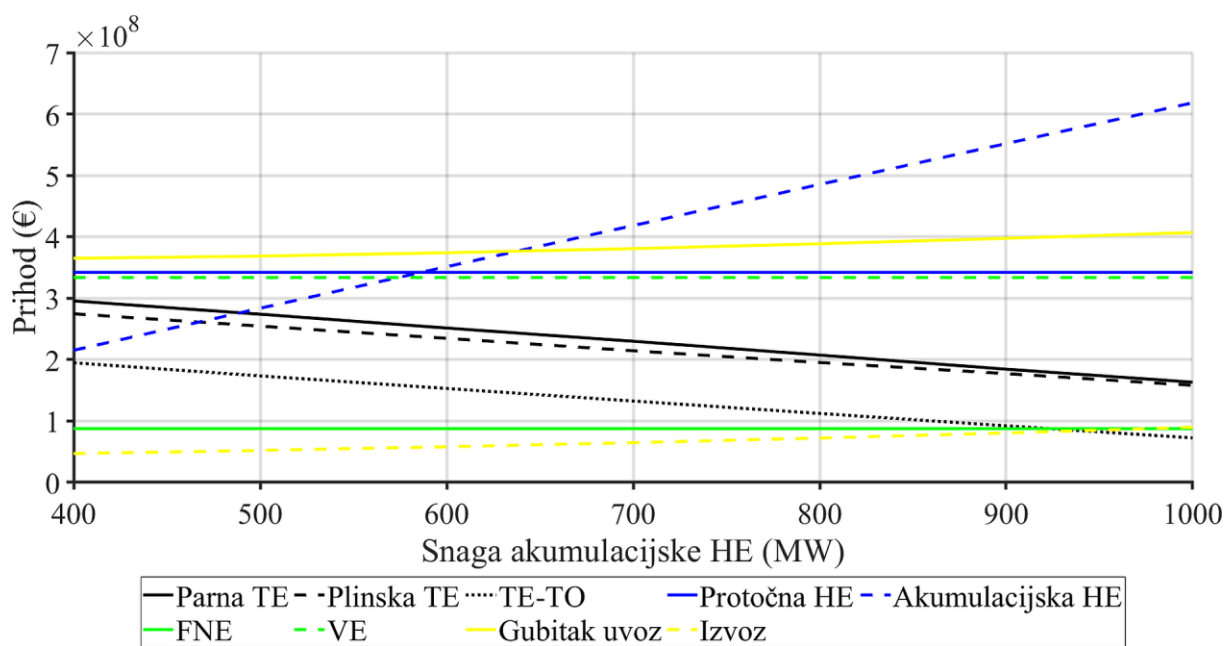
Slika 3.36 Energije RHE u slučaju povećanja udjela proizvodnje akumulacijske HE



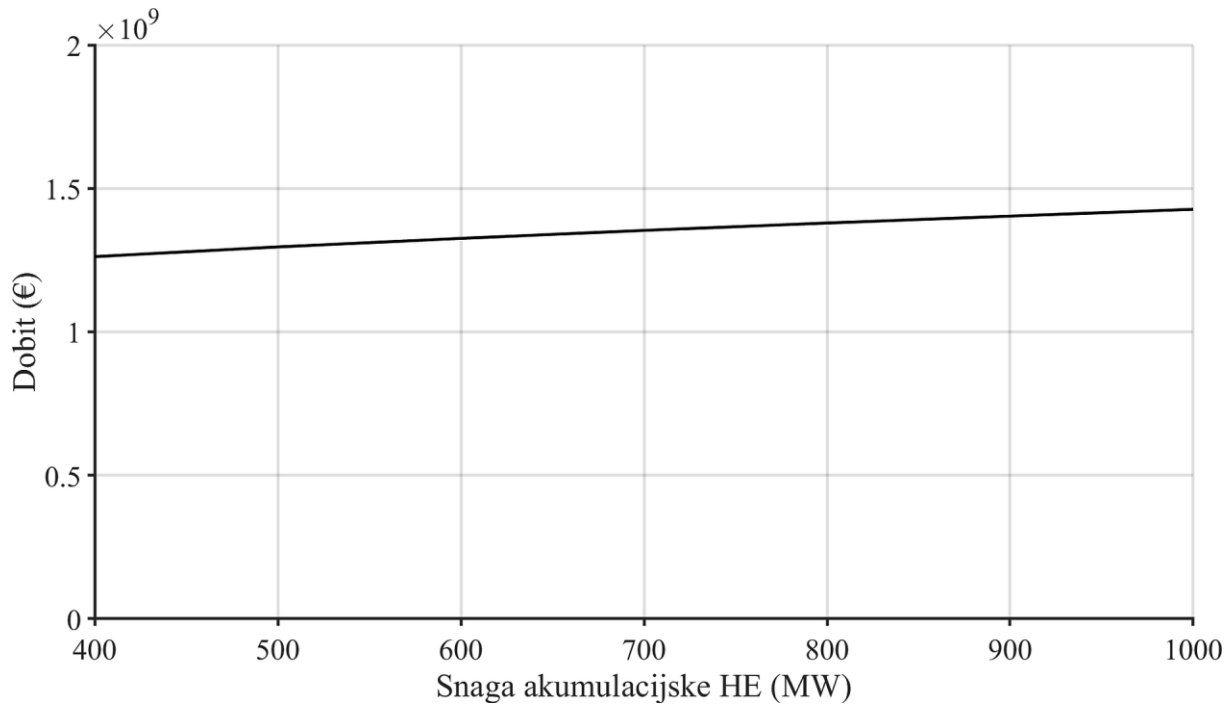
Slika 3.37 Energije ostalih proizvođača u slučaju povećanja udjela proizvodnje akumulacijske HE



Slika 3.38 Sati rada ostalih proizvođača u slučaju povećanja udjela proizvodnje akumulacijske HE



Slika 3.39 Prihodi ostalih proizvođača u slučaju povećanja udjela proizvodnje akumulacijske HE



Slika 3.40 Ukupna dobit cjelokupnog sustava u slučaju povećanja udjela proizvodnje akumulacijske HE

3.5.2. Povećanje udjela proizvodnje IOIE

U ovim simulacijama povećavao se udio proizvedene energije iz IOIE. Napravilo se 7 primjera na način da svaki novi primjer ima približno 20% više energije iz FNE i 23% više energije iz VE s obzirom na osnovni slučaj. Također, gornje granice snaga za pomoćne usluge reg-up i reg-down nisu fiksne, već se povećavaju s porastom udjela proizvodnje iz IOIE. Parametri koji se mijenjaju u ovim simulacijama prikazani su u tablici 3.32. Rezultati navedenih simulacija su prikazani u tablicama 3.33-3.38 te grafički na slikama 3.41-3.47.

Tablica 3.32 Parametri sustava koji se mijenjaju u simulacijama u slučaju povećanja proizvodnje IOIE

Primjer br.	1	2	3	4	5	6	7
FNE (rel.)	10	12	14	16	18	20	22
VE (rel.)	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8	3,1
$h_{n,t,1}^u$ (10^6 m ³)	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16
$h_{n,t,2}^u$ (10^6 m ³)	0,03	0,045	0,06	0,075	0,09	0,105	0,12
$terpa_{n,t}^u$ (MW)	300	270	240	210	180	150	120
$terpl_{n,t}^u$ (MW)	300	270	240	210	180	150	120
$tertop_{n,t}^u$ (MW)	200	170	140	110	80	50	20
$tertop_{n,t}^l$ (MW)	50	34	28	22	16	10	4
$terpa_snagaIagr$ (MW)	150	135	120	105	90	75	60
$terpl_snagaIagr$ (MW)	100	135	120	105	90	75	60
$tertop_snagaIagr$ (MW)	100	85	70	55	40	25	10
$terpa_teh_min$ (MW)	60	54	48	42	36	30	24
$terpl_teh_min$ (MW)	20	54	48	42	36	30	24
$tertop_teh_min$ (MW)	40	34	28	22	16	10	4

Analizom rezultata proračuna uočava se da postupnim povećavanjem udjela energije iz IOIE:

- energija spremišta za prodaju na DAM i energija za pumpanje opadaju, dok energija i snaga za usluge reg-up i reg-down značajno raste, što ukazuje da se spremište sve više okreće pomoćnim uslugama nego arbitraži, tablica 3.33 te slika 3.41 i slika 3.43
- pored toga što proizvodnja IOIE raste, a svih TE pada (kako je zadano), proizvodnja protočnih i akumulacijskih HE je približno konstantna. Istovremeno rastu uvoz i izvoz. Očito da oscilacije proizvodnje IOIE sustav uravnotežuje kroz uvoz i izvoz (puno jeftine proizvodnje iz IOIE koju se isplati i jeftino izvoziti), tablica 3.33 te slika 3.42
- sati proizvodnje na DAM-u rastu, što znači da spremište radi manjom snagom, tablica 3.34, a to se može vidjeti i iz tablice 3.35 koja prikazuje angažman snage RHE
- sati rada parne i plinske TE konstantno padaju, dok su sada radi TE-TO uvijek 8760. Sati rada ostalih izvora, su približno konstantni, tablica 3.34 te slika 3.44
- sati uvoza i sati izvoza rastu (i energija uvoza i izvoza raste), tablica 3.34 te slika 3.44
- prihodi od prodaje energije na DAM-u, ali i troškovi pumpanja padaju, ali se značajno povećavaju prihodi od reg-up i reg-down (čak i gubitak zbog reg-down energije raste), tablica 3.36. Ukupno gledajući, s povećanjem udjela IOIE naspram energije iz TE, uloga i prihod spremišta raste, tablica 3.36 te slika 3.45
- prihodi svih TE opadaju dok prihodi IOIE konstantno rastu. Prihodi protočne i akumulacijske HE su konstantni, dok raste gubitak uvoza i prihod od izvoza (svi prihodi sukladni energijama), tablica 3.37 te slika 3.46
- prihodi sustava očekivano rastu najviše zbog povećanja proizvodnje iz IOIE, uz smanjenje troška najviše radi proizvodnje u TE, tablica 3.37. Ukupno gledajući, dobit sustava konstantno raste, tablica 3.38 te slika 3.47

Povećanjem udjela energije iz VE i FNE, korištenje spremišta energije i potrošnja energije za pumpanje je sve više opravdano radi velike oscilacije proizvodnje. Povećanje udjela IOIE u energetsom miksu EES-a zapravo povećava potrebu za spremištem energije, odnosno povećanje udjela IOIE povećava optimalnu veličinu spremišta energije u sustavu.

Dakle, promjena strukture proizvodnje u EES radi povećanja udjela intermitentnih OIE ima bitno drukčiji utjecaj na rad spremišta energije nego povećanje udjela upravljivih akumulacijskih HE. Povećanjem udjela IOIE, značajno rastu prihodi i uloga spremišta energije u optimiranju rada sustava. Nasuprot tome, povećanjem udjela akumulacijskih HE padaju prihodi i uloga spremišta energije. U oba slučaja dobiti pogona cjelokupnog sustava rastu jer se smanjuju troškovi goriva u termoelektranama.

Tablica 3.33 Energije RHE i ostalih proizvođača te snage pomoćnih usluga RHE u slučaju povećanja proizvodnje IOIE

	Energije RHE (MWh)						
Primjer br.	1	2	3	4	5	6	7
DAM	1.777.241	1.730.910	1.692.502	1.652.913	1.613.141	1.568.906	1.525.350
Reg-up	107.563	161.403	214.874	268.114	321.682	375.544	428.973
Reg-down	62.356	93.527	124.675	155.964	187.180	218.401	249.705
Havarijska	1.501	1.499	1.497	1.489	1.485	1.475	1.467
Pumpanje	381.215	366.957	362.923	358.141	352.615	344.444	335.536
	Energije ostalih proizvođača (MWh)						
Primjer br.	1	2	3	4	5	6	7
Parna TE	2.473.584	2.177.628	1.887.416	1.616.323	1.346.862	1.103.412	848.621
Plinska TE	2.107.948	1.884.761	1.664.003	1.444.666	1.227.302	1.016.517	811.096
TE-TO	1.614.004	1.346.781	1.086.840	832.036	597.853	358.549	129.371
Protočna HE	3.033.993	3.033.921	3.033.503	3.031.698	3.031.293	3.031.293	3.031.026
Akumulacijska HE	1.727.366	1.727.408	1.727.031	1.726.762	1.726.437	1.726.304	1.725.651
FNE	844.070	1.012.884	1.181.698	1.350.512	1.519.326	1.688.140	1.856.954
VE	2.677.678	3.295.654	3.913.529	4.531.454	5.149.380	5.767.306	6.385.231
Uvoz	2.593.180	2.695.970	2.817.080	2.954.070	3.106.151	3.267.602	3.449.007
Izvoz	361.790	455.567	579.607	743.167	948.349	1.189.434	1.454.738
Preljev RHE	243.759	259.083	275.157	292.431	308.687	327.521	345.412
Preljev akumulacijske HE	20.806	20.765	21.141	21.410	21.736	21.869	22.522
	Snage pomoćnih usluga RHE (MW)						
Primjer br.	1	2	3	4	5	6	7
Reg-up	334.470	501.023	665.992	830.201	994.276	1.158.790	1.319.610
Reg-down	259.376	389.149	518.615	648.634	778.150	907.932	1.038.283
Havarijska	62.504	62.492	62.335	62.230	61.981	61.636	61.046

Tablica 3.34 Sati rada RHE i ostalih proizvođača u slučaju povećanja proizvodnje IOIE

	Sati rada RHE (h)						
Primjer br.	1	2	3	4	5	6	7
Mirovanje	29	27	26	26	18	18	20
DAM	6.700	6.735	6.767	6.801	6.825	6.847	6.848
Reg-up snaga	8.375	8.362	8.354	8.329	8.314	8.305	8.290
Reg-up energija	8.375	8.362	8.354	8.329	8.314	8.305	8.290
Reg-down snaga	8.647	8.650	8.650	8.655	8.651	8.651	8.655
Reg-down energija	8.449	8.451	8.450	8.455	8.451	8.452	8.456
Havarijska snaga	6.264	6.262	6.240	6.231	6.205	6.176	6.113
Havarijska energija	6.264	6.262	6.240	6.231	6.205	6.176	6.113
Pumpanje	2.031	1.998	1.967	1.933	1.917	1.895	1.892
Preljev RHE	195	189	219	229	257	270	275
	Sati rada ostalih proizvođača (h)						
Primjer br.	1	2	3	4	5	6	7
Parna TE	8.548	8.306	8.082	8.006	7.720	7.670	7.423
Plinska TE	7.845	7.676	7.621	7.549	7.425	7.367	7.300
TE-TO	8.760	8.760	8.760	8.760	8.760	8.760	8.760
Protočna HE	8.719	8.719	8.719	8.719	8.719	8.719	8.719
Akumulacijska HE	8.729	8.741	8.741	8.741	8.741	8.741	8.723
Preljev akumulacijske HE	74	77	78	81	80	81	90
FNE	4.220	4.220	4.220	4.220	4.220	4.220	4.220
VE	8.682	8.683	8.682	8.682	8.682	8.682	8.682
Uvoz	4.814	4.863	4.903	4.940	4.975	4.991	5.022
Izvoz	1.172	1.378	1.586	1.851	2.142	2.409	2.649

Tablica 3.35 Angažirana snaga RHE (%)u slučaju povećanja proizvodnje IOIE

Primjer br.	1	2	3	4	5	6	7
0,1-50 MW	0	0	0	0	0	0	0
50,1-100 MW	0	0	0	0	0	0	0
100,1-150 MW	26	23	17	13	8	4	0
150,1-200 MW	2	6	12	16	18	19	20
200,1-250 MW	4	4	4	4	5	7	8
250,1-300 MW	2	2	2	2	2	2	3
300,1-350 MW	4	4	3	3	3	3	3
350,1-400 MW	2	2	2	2	2	65	66
400,1-450 MW	7	6	60	60	62	0	0
550,1-500 MW	53	53	0	0	0	0	0

Tablica 3.36 Prihodi, troškovi pogona te dobit RHE u slučaju povećanja proizvodnje IOIE

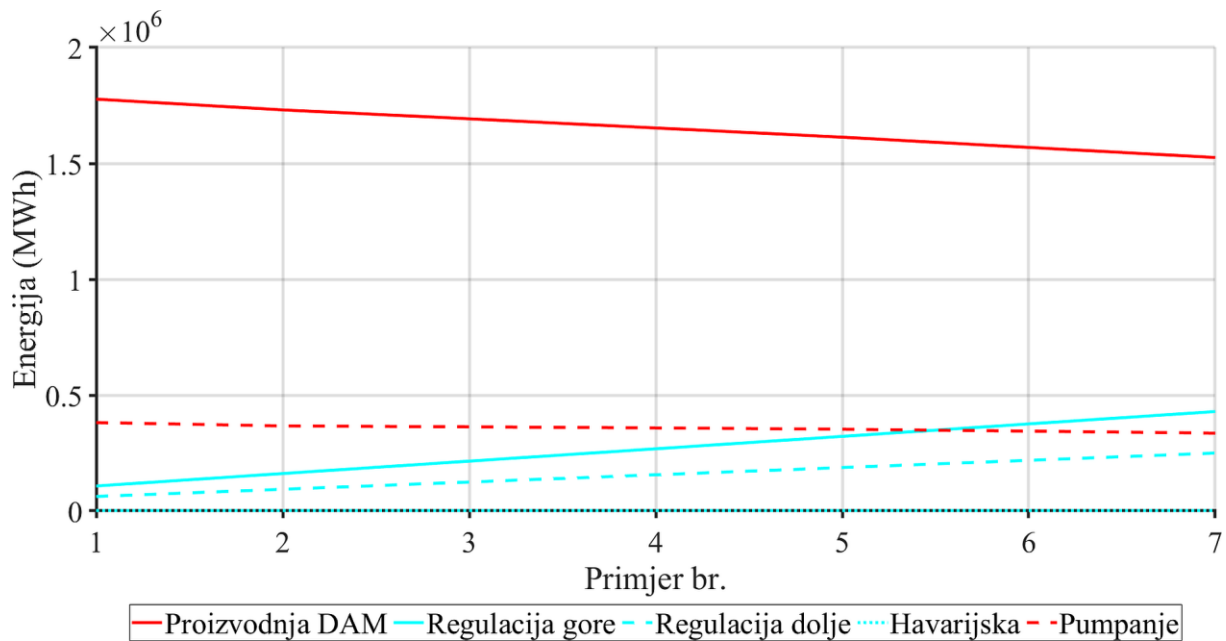
Primjer br.	Prihodi (€)						
	1	2	3	4	5	6	7
DAM	238.109.243	230.894.803	224.399.433	217.934.493	211.451.655	204.663.619	197.982.860
Gubitak pumpanja	30.892.961	29.765.753	29.289.996	28.852.450	28.369.413	27.871.779	27.388.576
Reg-up snaga	52.807.727	79.116.903	105.101.514	130.994.204	156.815.823	182.760.163	208.167.705
Reg-up energija	860.507	1.291.224	1.718.995	2.144.913	2.573.455	3.004.354	3.431.783
Reg-down snaga	42.181.381	63.256.770	84.291.670	105.386.482	126.479.362	147.589.669	168.684.668
Gubitak reg-down energija	374.137	561.164	748.052	935.783	1.123.079	1.310.408	1.498.229
Hav snaga	10.136.836	10.137.779	10.127.774	10.123.728	10.073.168	9.988.904	9.886.131
Hav energija	12.008	11.990	11.980	11.914	11.881	11.798	11.733
Primjer br.	Troškovi pogona (€)						
	1	2	3	4	5	6	7
Fiksni trošak	1.156.320	1.156.320	1.156.320	1.156.320	1.156.320	1.156.320	1.156.320
Ovisan o radu	960.410	960.630	960.740	960.740	961.620	961.620	961.400
Ovisan o energiji	7.541.662	7.411.968	7.343.155	7.266.452	7.187.961	7.086.132	6.982.345
Trošak pokretanja	718.300	727.100	751.300	757.900	772.200	794.200	800.800
Primjer br.	Dobit RHE (€)						
	1	2	3	4	5	6	7
Dobit	302.463.912	344.126.534	385.401.802	426.666.090	467.834.751	508.838.047	549.377.210

Tablica 3.37 Prihodi, trošak rada i trošak pokretanja ostalih proizvođača u slučaju povećanja proizvodnje IOIE

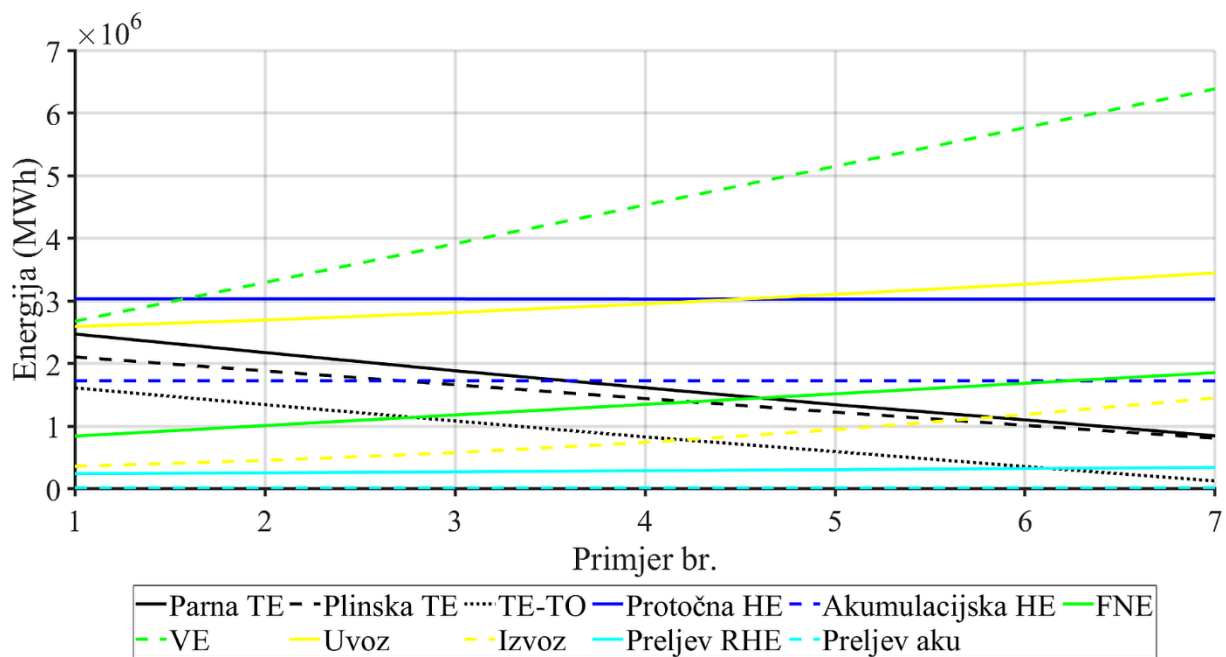
	Prihod (€)						
Primjer br.	1	2	3	4	5	6	7
Parna TE	295.629.544	263.468.445	231.518.591	200.575.359	169.596.425	140.214.276	110.101.028
Plinska TE	274.631.770	246.584.153	218.470.595	190.427.377	162.500.644	135.001.296	107.763.595
TE-TO	194.879.135	164.229.305	133.862.839	103.883.541	75.170.436	46.024.834	17.576.241
Protočna HE	342.018.060	342.017.995	342.017.598	342.016.856	342.016.461	342.016.461	342.016.174
Akumulacijska HE	215.211.765	215.217.541	215.178.046	214.984.233	214.936.428	214.842.337	214.705.115
FNE	87.585.235	105.102.282	122.619.329	140.136.376	157.653.423	175.170.470	192.687.517
VE	333.730.216	410.744.026	487.759.546	564.774.211	641.788.876	718.803.541	795.818.206
Gubitak uvoz	365.038.973	383.443.259	404.453.502	427.785.855	453.658.186	480.740.994	509.627.680
Izvoz	46.970.515	56.986.590	68.692.879	82.546.233	98.829.745	116.677.409	135.662.897
	Troškovi rada (€)						
Primjer br.	1	2	3	4	5	6	7
Parna TE	123.679.183	108.881.397	94.370.790	80.816.150	67.343.084	55.170.599	42.431.028
Plinska TE	158.096.078	141.357.058	124.800.191	108.349.944	92.047.626	76.238.743	60.832.164
TE-TO	104.910.288	87.540.739	70.644.607	54.082.347	38.860.431	23.305.654	8.409.140
Protočna HE	3.033.993	3.033.921	3.033.503	3.031.698	3.031.293	3.031.293	3.031.026
Akumulacijska HE	3.454.733	3.454.816	3.454.063	3.453.525	3.452.874	3.452.608	3.451.301
	Troškovi pokretanja (€)						
Primjer br.	1	2	3	4	5	6	7
Parna TE	2.100.000	2.310.000	2.590.000	2.870.000	3.290.000	3.430.000	3.360.000
Plinska TE	2.220.000	1.520.000	1.540.000	1.500.000	1.470.000	1.410.000	1.300.000
TE-TO	640.000	700.000	780.000	780.000	640.000	520.000	240.000
Protočna HE	14.000	14.000	14.000	14.700	14.700	14.700	14.700
Akumulacijska HE	709.000	720.500	735.000	744.500	765.500	774.500	782.000

Tablica 3.38 Dobit cjelokupnog sustava (€) u slučaju povećanja proizvodnje IOIE

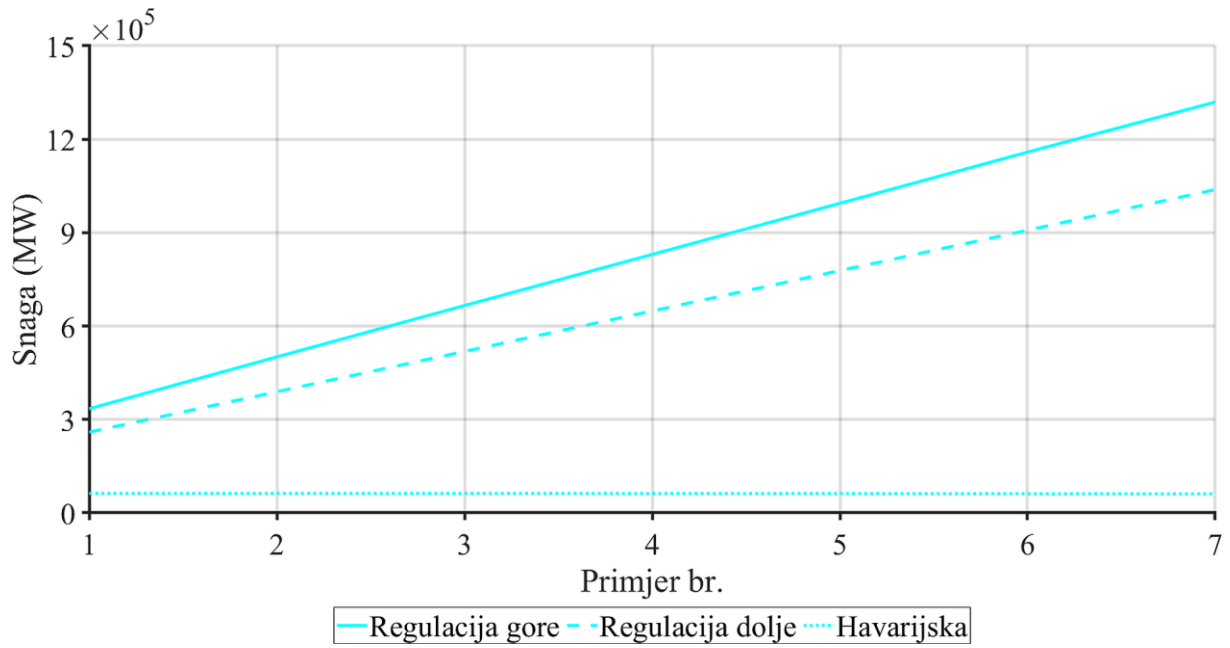
Primjer br.	1	2	3	4	5	6	7
Dobit	1.262.123.168	1.334.091.765	1.400.972.884	1.464.658.367	1.524.568.145	1.582.817.566	1.638.424.805



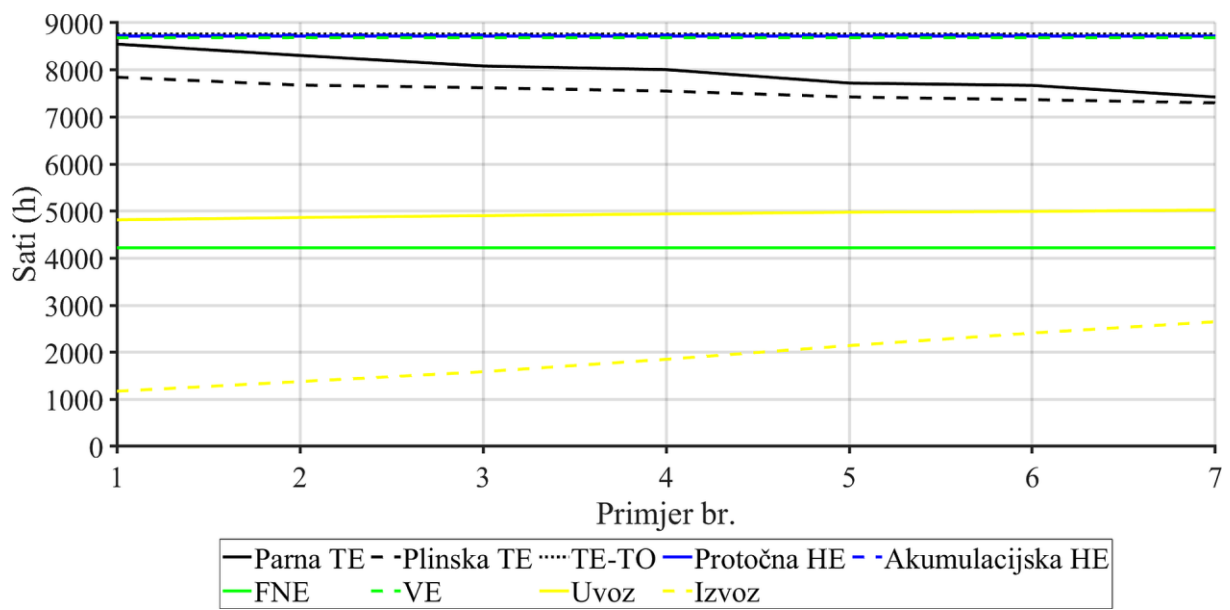
Slika 3.41 Energije RHE u slučaju povećanja proizvodnje IOIE



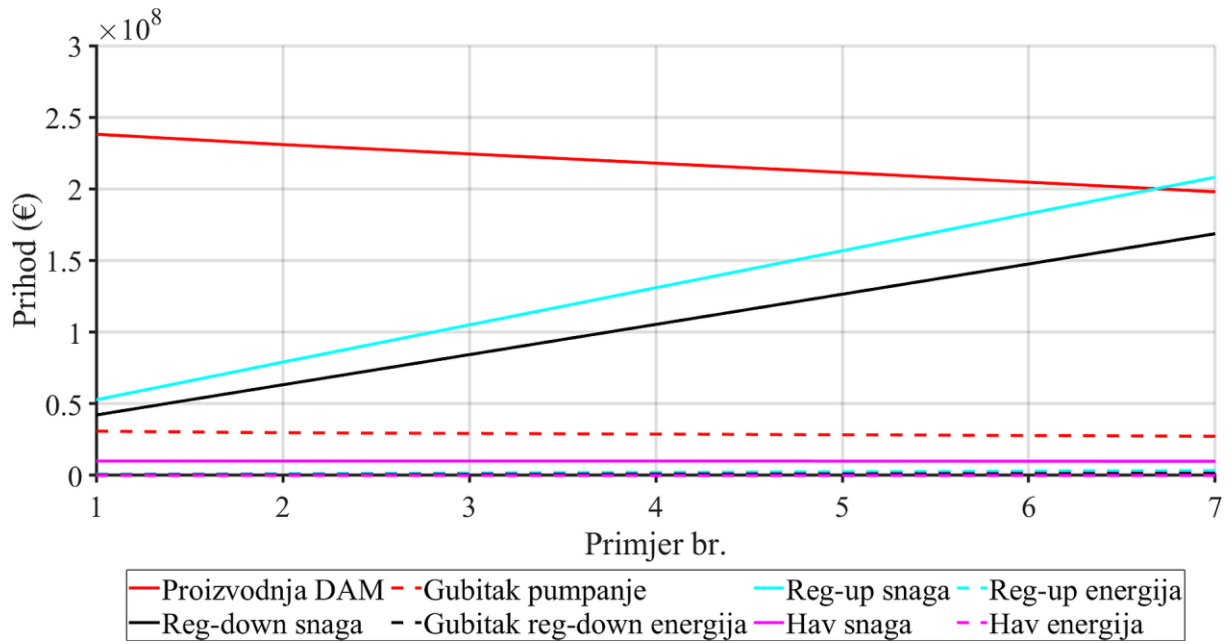
Slika 3.42 Energije ostalih proizvođača u slučaju povećanja proizvodnje IOIE



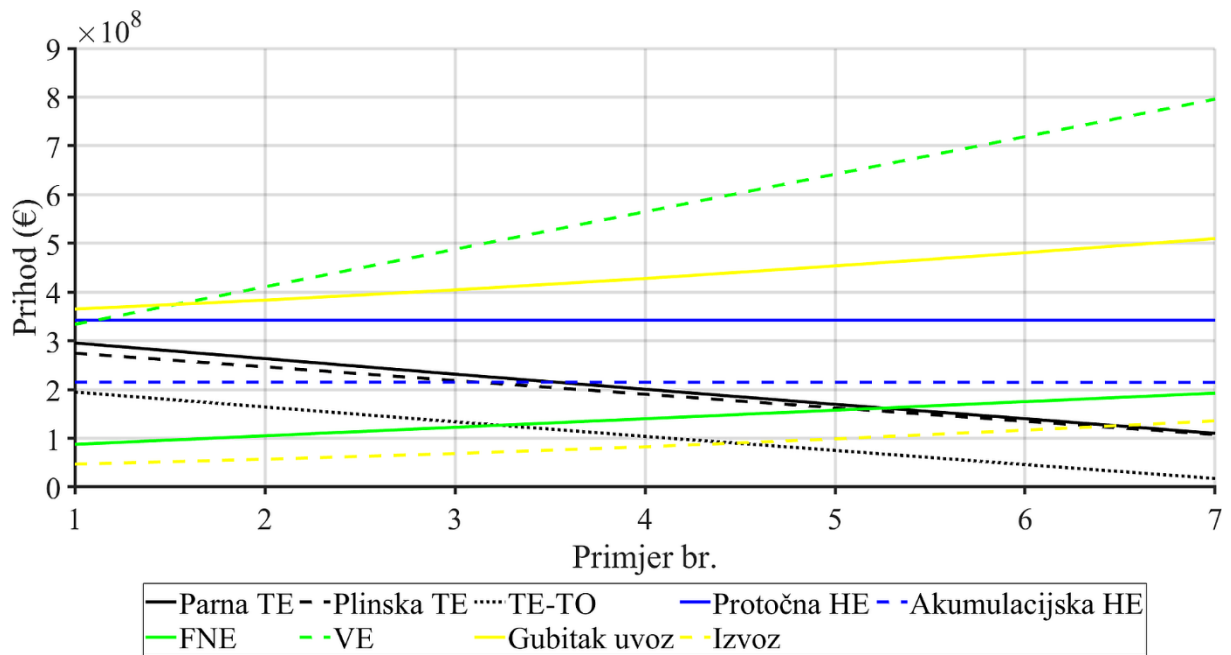
Slika 3.43 Snage pomoćnih usluga RHE u slučaju povećanja proizvodnje IOIE



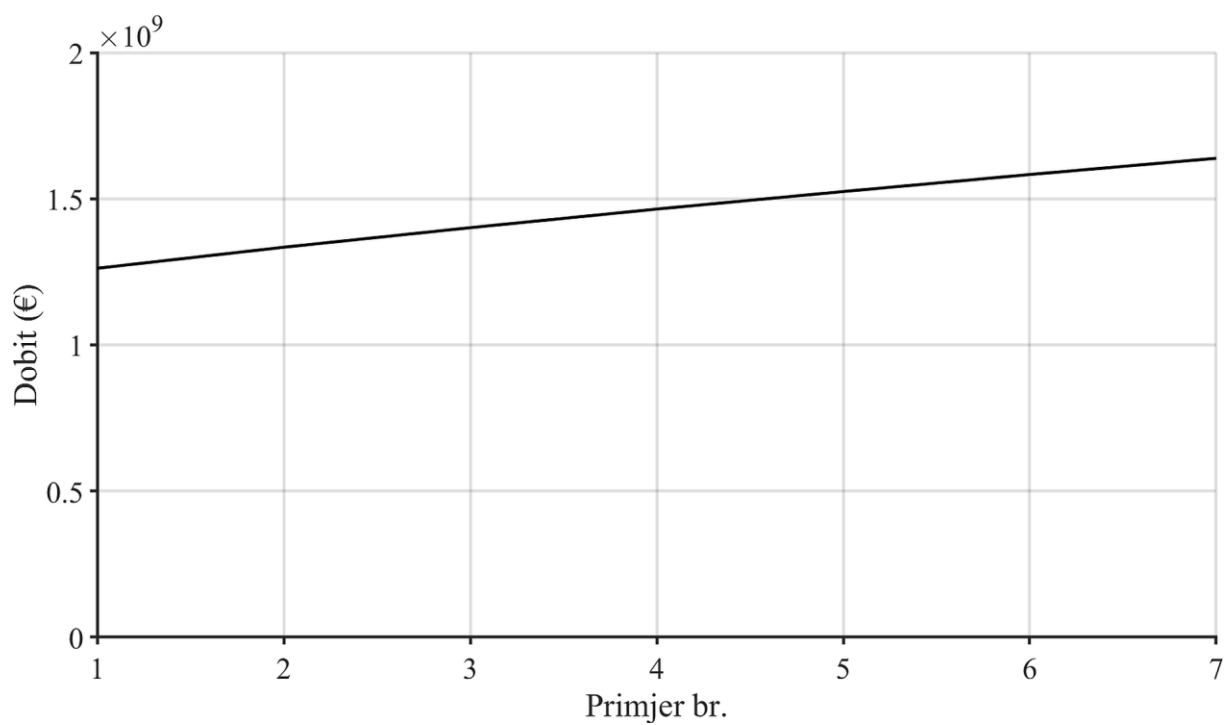
Slika 3.44 Sati rada ostalih proizvođača u slučaju povećanja proizvodnje IOIE



Slika 3.45 Prihodi RHE u slučaju povećanja proizvodnje IOIE



Slika 3.46 Prihodi ostalih proizvođača u slučaju povećanja proizvodnje IOIE



Slika 3.47 Ukupna dobit cjelokupnog sustava u slučaju povećanja proizvodnje IOIE

4. ZAKLJUČAK

Zbog stalnog rasta potreba za energijom i sve veće zastupljenosti proizvodnje iz obnovljivih izvora energije (posebno sunca i vjetra), spremišta energije se nameću kao jedno od rješenja za sigurniji i pouzdaniji elektroenergetski sustav te se smatraju jednim od rješenja za integraciju velikih količina energije iz intermitentnih obnovljivih izvora energije. Pored klasičnih reverzibilnih hidroelektrana pogodnih za spremanje velike količine energije, zadnjih se godina intenzivno razvija i komercijalizira nekoliko tipova baterija prikladnih za primjenu u dnevnom režimu rada u EES-u, a istražuju se i druge tehnologije spremanja energije.

U radu je predstavljen jedinstveni model za optimizaciju rada spremišta energije u tržišno orijentiranom elektroenergetskom sustavu. Model se ne bavi specifičnostima pojedine tehnologije, već je univerzalni model za optimiranje rada spremišta više tehnologija. Prilagođenje raznim tehnologijama ostvarena su uvođenjem tzv. energetske koeficijentnosti za svaku pojedinu tehnologiju. Detaljno je obrazložena funkcija cilja i dodatna ograničenja u modelu. Model je testiran na nizu primjera.

Predloženi model optimizira dnevni ciklus punjenja i pražnjenja spremišta, ali u dužem periodu promatranja kako bi obuhvatio što više mogućih kombinacija niza utjecajnih parametara. Optimiranje rada spremišta je stohastički problem zbog stohastičnosti niza veličina.

Predloženi model omogućava optimiranje rada spremišta elektroenergetskih sustava u realnim tržišnim uvjetima u kojem spremište energije prihod može ostvariti kroz arbitražu i različite usluge. Model mogu koristiti različite interesne skupine: novi investitori koji su zainteresirani za ulaganje u tehnologiju spremanja energije, neovisni proizvođači energije koji bi dodatnim investiranjem u spremište energije značajno ojačali svoj položaj na energetsom tržištu kao i operatori sustava za razvoj i optimiranje pogona cijelog sustava...

Investitori koji su zainteresirani za ulaganje u tehnologiju spremanja energije, predloženim modelom mogu računati očekivane prihode i troškove pogona za spremište određenih karakteristika i uspoređivati ih s troškovima investicije. Mogu ispitivati različite varijante spremišta, mijenjati ulazne podatke i promatrati utjecaj na konačni rezultat.

Neovisni proizvođači energije (GENCO) koji u svom portfelju već imaju neke, najčešće intermitentne obnovljive izvore energije, predloženim modelom mogu računati isplativost dodatnog ulaganja u spremište energije kojim bi smanjili penale zbog neisporučene električne energije ili povećali tržišnu moć ugovaranjem većih isporuka energije.

Operatorima sustava predloženi model, pored proračuna optimalnog korištenja postojećih spremišta energije, može pomoći u izboru optimalne veličine spremišta energije u sustavu s danim karakteristikama. Predloženim modelom se također može promatrati utjecaj strukture sustava na optimalnu veličinu spremišta. Primjerom je pokazano kako se povećanjem udjela akumulacijskih hidroelektrana, naspram termoelektranama, smanjuje važnost spremišta i potrebe za instaliranim spremišnim kapacitetima. Nasuprot tome, pokazano je kako povećanjem udjela intermitentnih obnovljivih izvora energije, naspram termoelektranama, raste važnost spremišta i potrebe za instaliranim spremišnim kapacitetima.

Dakle, u radu je problematika optimizacije rada spremišta energije obrađena sustavno i cjelovito. Dokazane su početne hipoteze da optimalni rad spremišta energije u EES-u koji radi u tržišnim uvjetima ovisi o nizu faktora: o karakteristikama spremišta energije, strukturi i zahtjevima elektroenergetskog sustava, varijaciji cijena električne energije, cijeni pomoćnih usluga itd. Za pojedini EES s definiranim potrebama za isporukom električne energije i s određenom strukturom proizvodnih jedinica te poznatim cijenama moguće je odrediti optimalni režim rada spremišta energije u promatranom periodu. Kako je niz veličina unaprijed nepoznat (cijene energije, hidrologija,...) mora se primijeniti stohastički pristup.

LITERATURA

- [1] Haas, J. i dr.: "Challenges and trends of energy storage expansion planning for flexibility provision in low-carbon power systems – a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 80, pp. 603-619, 2017.
- [2] Yunusov, T.; Zangs, M.; Holderbaum, W.: "Control of Energy Storage", *Energies*, Vol. 10, pp. 1010, 2017.
- [3] Catalbas, M. C.: "Impacts of COVID-19 pandemic on electrical energy storage technologies", *Energy Storage*, Vol. n/a, No. n/a, pp. e305, 2021.
- [4] Baumgarte, F.; Glenk, G.; Rieger, A.: "Business Models and Profitability of Energy Storage", *iScience*, Vol. 23, No. 10, pp. 101554-101554, 2020.
- [5] Zach, K. i dr.: "Contribution of Bulk Energy Storage in Future Electricity Systems Facilitating Renewable Energy Expansion". 2012. p. 60.
- [6] Koochi-Kamali, S. i dr.: "Emergence of energy storage technologies as the solution for reliable operation of smart power systems: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 25, pp. 135-165, 2013.
- [7] Beaudin, M. i dr.: "Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review", *Energy for Sustainable Development*, Vol. 14, No. 4, pp. 302-314, 2010.
- [8] Li, J.; Li, Z.; Wang, Y.: "Optimal bidding strategy for day-ahead power market", 2015 North American Power Symposium (NAPS), pp. 1-6, 2015.
- [9] Tade, S. V.; Ghate, V. N.; Kalage, A. A.: "Economic Operation of Pumped Hydro Storage Plant using Teaching Learning based Optimization (TLBO) Algorithm", 2017 International Conference on Current Trends in Computer, Electrical, Electronics and Communication (CTCEEC), pp. 864-869, 2017.
- [10] Pandžić, K.; Pandžić, H.; Kuzle, I.: "Coordination of Regulated and Merchant Energy Storage Investments", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 9, No. 3, pp. 1244-1254, 2018.
- [11] Cebulla, F. i dr.: "How much electrical energy storage do we need? A synthesis for the U.S., Europe, and Germany", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 181, pp. 449-459, 2018.
- [12] Telaretti, E.; Ippolito, M.; Dusonchet, L.: "A Simple Operating Strategy of Small-Scale Battery Energy Storages for Energy Arbitrage under Dynamic Pricing Tariffs", *Energies*, Vol. 9, No. 1, pp. 12, 2016.
- [13] Táci, I.; Szorenyi, G.: "Pumped storage hydroelectric power plants: issues and applications", Budapest, Hungary: Paper Presented at the Energy Regulators Regional Association Secretariat (ERRAS), 2016.
- [14] Pérez-Díaz, J. I. i dr.: "Trends and challenges in the operation of pumped-storage hydropower plants", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 44, pp. 767-784, 2015.

- [15] Mandić, M. i dr.: "Impact of the Electricity Market Prices during the COVID-19 Pandemic on Energy Storage Operation", u International Conference on Applied Energy. 2022: Istanbul, Turkey.
- [16] "Hydropower status report". 2021, International Hydropower Association. p. 25.
- [17] Dvorak, P.: "Challenges and opportunities for new pumped storage development". 2014.
- [18] Harby, A. i dr.: "Pumped Storage Hydropower". 2013. p. 597-618.
- [19] Rehman, S.; Al-Hadhrami, L. M.; Alam, M. M.: "Pumped hydro energy storage system: A technological review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 44, pp. 586-598, 2015.
- [20] Evans, A.; Strezov, V.; Evans, T. J.: "Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, No. 6, pp. 4141-4147, 2012.
- [21] Riabenko, O. i dr.: "Increasing the Role of Hydro and Pumped Storage Power Plants in Energy Systems Operation Management", 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), pp. 424-428, 2020.
- [22] Mandić, M.; Sutlović, E.; Modrić, T.: "A general model of optimal energy storage operation in the market conditions", Electric Power Systems Research, Vol. 209, pp. 107957, 2022.
- [23] Divya, K. C.; Østergaard, J.: "Battery energy storage technology for power systems—An overview", Electric Power Systems Research, Vol. 79, No. 4, pp. 511-520, 2009.
- [24] Dehghani-Sani, A. R. i dr.: "Study of energy storage systems and environmental challenges of batteries", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 104, pp. 192-208, 2019.
- [25] "Baš malo o litij-ion baterijama", s Interneta, <https://e-radionica.com/hr/blog/2016/07/13/bas-malo-o-litij-ion-baterijama/>,
- [26] Robyns, B. i dr.: "Energy Storage in Electric Power Grids", 2015.
- [27] Díaz-González, F. i dr.: "A review of energy storage technologies for wind power applications", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, No. 4, pp. 2154-2171, 2012.
- [28] Horiba, T.: "Lithium-Ion Battery Systems", Proceedings of the IEEE, Vol. 102, No. 6, pp. 939-950, 2014.
- [29] Liu, J.; Wang, Z.; Hu, C.: "Optimizing Size of Lithium-Ion Battery Combined with PV Generation", 2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), pp. 1-6, 2019.
- [30] Fler, J. i dr.: "Techno-economic evaluation of battery energy storage systems on the primary control reserve market under consideration of price trends and bidding strategies", The Journal of Energy Storage, Vol. 17, 2018.
- [31] Olk, C.; Sauer, D. U.; Merten, M.: "Bidding strategy for a battery storage in the German secondary balancing power market", Journal of Energy Storage, Vol. 21, pp. 787-800, 2019.

- [32] Merten, M. i dr.: "Bidding strategy for battery storage systems in the secondary control reserve market", *Applied Energy*, Vol. 268, pp. 114951, 2020.
- [33] Maeyaert, L.; Vandeveld, L.; Döring, T.: "Battery Storage for Ancillary Services in Smart Distribution Grids", *Journal of Energy Storage*, Vol. 30, pp. 101524, 2020.
- [34] Heredia, F. J.; Cuadrado, M. D.; Corchero, C.: "On optimal participation in the electricity markets of wind power plants with battery energy storage systems", *Computers & Operations Research*, Vol. 96, pp. 316-329, 2018.
- [35] Terlouw, T. i dr.: "Multi-objective optimization of energy arbitrage in community energy storage systems using different battery technologies", *Applied Energy*, Vol. 239, pp. 356-372, 2019.
- [36] "Electrochemistry chemical change and electrical work", s Interneta, <https://documents.in/document/chapter-21-electrochemistry-chemical-change-and-electrical-work-56b02196886e4.html>,
- [37] "Lead-acid battery", s Interneta, <https://www.off-grid-europe.com/info/lead-acid-battery/>,
- [38] May, G. J.; Davidson, A.; Monahov, B.: "Lead batteries for utility energy storage: A review", *Journal of Energy Storage*, Vol. 15, pp. 145-157, 2018.
- [39] "Redox flow battery", s Interneta, <http://impress-energystorage.com/redox-flow-battery/>,
- [40] Mutarraf, M. U. i dr.: "Energy Storage Systems for Shipboard Microgrids—A Review", *Energies*, Vol. 11, No. 12, 2018.
- [41] Breeze, P.: "Chapter 5 - Superconducting Magnetic Energy Storage", *Power System Energy Storage Technologies*, P. Breeze, Editor. 2018, Academic Press. p. 47-52.
- [42] Aslani, M.: "Electrochemical double layer capacitors (supercapacitors)", Stanford University, 2012.
- [43] Glass, E.; Glass, V.: "Enabling supercapacitors to compete for ancillary services: An important step towards 100 % renewable energy", *The Electricity Journal*, Vol. 33, No. 5, pp. 106763, 2020.
- [44] Muyeen, S. M. i dr.: "Application of energy capacitor system (ECS) to wind power generation", *Wind Energy*, Vol. 11, pp. 335-350, 2008.
- [45] Kinjo, T. i dr.: "Output levelling of renewable energy by electric double-layer capacitor applied for energy storage system", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 21, No. 1, pp. 221-227, 2006.
- [46] Kinjo, T. i dr.: "Output levelling of wind power generation system by EDLC energy storage", 30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2004. *IECON 2004*, Vol. 3, pp. 3088-3093 Vol. 3, 2004.
- [47] Mufti, M. u. d. i dr.: "Super-capacitor based energy storage system for improved load frequency control", *Electric Power Systems Research*, Vol. 79, No. 1, pp. 226-233, 2009.
- [48] Nikolaidis, P.; Poullikkas, A.: "A comparative review of electrical energy storage systems for better sustainability", *Journal of power technologies*, 2017.
- [49] Arabkoohsar, A.: "Compressed air energy storage system". 2021. p. 45-71.

- [50] Kanakasabapathy, P.; Shanti Swarup, K.: "Bidding strategy for pumped-storage plant in pool-based electricity market", *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, No. 3, pp. 572-579, 2010.
- [51] Kusakana, K.: "Optimal Operation Control of Pumped Hydro Storage in the South African Electricity Market", *Energy Procedia*, Vol. 143, pp. 804-810, 2017.
- [52] Tica, E.; Popa, B.; Popa, R.: "Annual Performance Estimation of a Multireservoir System Including a Pumped Storage Plant for the Mean Hydrological Year", *Journal of Energy Engineering*, Vol. 143, 2017.
- [53] Hering, P. i dr.: "Optimal scheduling of a pumped-storage hydro power plant operation", 2013 13th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), pp. 166-171, 2013.
- [54] Ak, M.; Kentel, E.; Savasaneril, S.: "Quantifying the revenue gain of operating a cascade hydropower plant system as a pumped-storage hydropower system", *Renewable Energy*, Vol. 139, pp. 739-752, 2019.
- [55] Kazempour, S. J.; Hosseinpour, M.; Moghaddam, M. P.: "Self-scheduling of a joint hydro and pumped-storage plants in energy, spinning reserve and regulation markets", 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, pp. 1-8, 2009.
- [56] Chazarra, M.; Pérez-Díaz, J. I.; García-González, J.: "Value of perfect information of spot prices in the joint energy and reserve hourly scheduling of pumped storage plants", 2016 13th International Conference on the European Energy Market (EEM), pp. 1-6, 2016.
- [57] Braun, S.: "Hydropower Storage Optimization Considering Spot and Intraday Auction Market", *Energy Procedia*, Vol. 87, pp. 36-44, 2016.
- [58] Braun, S. M.; Burkhardt, M.: "Trading of pumped storage hydropower plants on energy only and ancillary services markets", 2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), pp. 649-653, 2015.
- [59] Connolly, D. i dr.: "Practical operation strategies for pumped hydroelectric energy storage (PHES) utilising electricity price arbitrage", *Energy Policy*, Vol. 39, No. 7, pp. 4189-4196, 2011.
- [60] Ning, L.; Chow, J. H.; Desrochers, A. A.: "Pumped-storage hydro-turbine bidding strategies in a competitive electricity market", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19, No. 2, pp. 834-841, 2004.
- [61] Tian, M.-W. i dr.: "Risk and profit-based bidding and offering strategies for pumped hydro storage in the energy market", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 256, pp. 120715, 2020.
- [62] Ruppert, L. i dr.: "An analysis of different pumped storage schemes from a technological and economic perspective", *Energy*, Vol. 141, pp. 368-379, 2017.
- [63] Chazarra, M.; Pérez-Díaz, J. I.; García-González, J.: "Optimal operation of variable speed pumped storage hydropower plants participating in secondary regulation reserve markets", 11th International Conference on the European Energy Market (EEM14), pp. 1-5, 2014.
- [64] Chazarra, M.; Pérez-Díaz, J. I.; García-González, J.: "Optimal Joint Energy and Secondary Regulation Reserve Hourly Scheduling of Variable Speed Pumped

- Storage Hydropower Plants", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 33, No. 1, pp. 103-115, 2018.
- [65] Lagarto, J. i dr.: "Optimal scheduling of a pumped storage hydro unit in the day-ahead and secondary reserve electricity market", 2015 12th International Conference on the European Energy Market (EEM), pp. 1-5, 2015.
- [66] Chazarra, M.; Pérez-Díaz, J. I.; García-González, J.: "Optimal Energy and Reserve Scheduling of Pumped-Storage Power Plants Considering Hydraulic Short-Circuit Operation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 32, No. 1, pp. 344-353, 2017.
- [67] Chazarra, M.; Pérez-Díaz, J. I.; García-González, J.: "Economic Viability of Pumped-Storage Power Plants Equipped with Ternary Units and Considering Hydraulic Short-Circuit Operation", Journal of Physics: Conference Series, Vol. 813, pp. 012013, 2017.
- [68] Chazarra, M.; Pérez-Díaz, J. I.; García-González, J.: "Deriving Optimal End of Day Storage for Pumped-Storage Power Plants in the Joint Energy and Reserve Day-Ahead Scheduling", Energies, Vol. 10, No. 6, 2017.
- [69] Chazarra, M. i dr.: "Economic viability of pumped-storage power plants participating in the secondary regulation service", Applied Energy, Vol. 216, pp. 224-233, 2018.
- [70] Alharbi, H.; Bhattacharya, K.: "Participation of Pumped Hydro Storage in Energy and Performance-Based Regulation Markets", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 35, No. 6, pp. 4307-4323, 2020.
- [71] Vargas-Serrano, A. i dr.: "Economic benefit analysis of retrofitting a fixed-speed pumped storage hydropower plant with an adjustable-speed machine", 2017 IEEE Manchester PowerTech, pp. 1-6, 2017.
- [72] Feng, J.-s.; Zhang, F.-q.; Yuan, B.: "Case Study on Scale Optimization of Pump-storage Variable Speed Units Based on Power System Operation Simulation", 2019.
- [73] Filipe, J. i dr.: "On the Profitability of Variable Speed Pump-Storage-Power in Frequency Restoration Reserve", Journal of Physics: Conference Series, Vol. 813, pp. 012010, 2017.
- [74] Filipe, J. i dr.: "Optimal bidding strategy for variable-speed pump storage in day-ahead and frequency restoration reserve markets", Energy Systems, Vol. 10, No. 2, pp. 273-297, 2019.
- [75] Yang, W.; Yang, J.: "Advantage of variable-speed pumped storage plants for mitigating wind power variations: Integrated modelling and performance assessment", Applied Energy, Vol. 237, pp. 720-732, 2019.
- [76] Nag, S.; Lee, K. Y.: "Network and Reserve Constrained Economic Analysis of Conventional, Adjustable-Speed and Ternary Pumped-Storage Hydropower", Energies, Vol. 13, No. 16, 2020.
- [77] Brown, P. D.; Lopes, J. A. P.; Matos, M. A.: "Optimization of Pumped Storage Capacity in an Isolated Power System With Large Renewable Penetration", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, No. 2, pp. 523-531, 2008.

- [78] Khatod, D. K.; Pant, V.; Sharma, J.: "Optimized daily scheduling of wind-pumped hydro plants for a day-ahead electricity market system", 2009 International Conference on Power Systems, pp. 1-6, 2009.
- [79] Kumar, M.; Saini, P.; Kumar, N.: "Optimization of wind-pumped storage hydro power system", International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences, Vol. 4, No. 4, pp. 67-75, 2016.
- [80] Duque, Á. J. i dr.: "Optimal operation of a pumped-storage hydro plant that compensates the imbalances of a wind power producer", Electric Power Systems Research, Vol. 81, No. 9, pp. 1767-1777, 2011.
- [81] Al-Swaiti, M.; Al-Awami, A.; Khalid, M.: "Co-optimized Trading of Wind-Thermal-Pumped Storage System in Energy and Regulation Markets", Energy, Vol. 138, 2017.
- [82] Cerejo, A. i dr.: "Hydro-wind Optimal Operation for Joint Bidding in Day-ahead Market: Storage Efficiency and Impact of Wind Forecasting Uncertainty", Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, Vol. 8, No. 1, pp. 142-149, 2020.
- [83] Xia, P. i dr.: "MILP Based Robust Short-Term Scheduling for Wind-Thermal-Hydro Power System With Pumped Hydro Energy Storage", IEEE Access, Vol. 7, pp. 30261-30275, 2019.
- [84] Yao, L. i dr.: "Optimal day-ahead coordination on wind-pumped-hydro system by using multiobjective multistage model", International Journal of Energy Research, Vol. 44, 2020.
- [85] Green, H.; Sanduk, M.: "Development of a Wind Turbine System With Energy Storage in the Form of Hydropower", 2013.
- [86] Castronuovo, E. D.; Lopes, J. A. P.: "On the optimization of the daily operation of a wind-hydro power plant", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 3, pp. 1599-1606, 2004.
- [87] Šćekić, L.; Mujović, S.; Radulović, V.: "Pumped Hydroelectric Energy Storage as a Facilitator of Renewable Energy in Liberalized Electricity Market", Energies, Vol. 13, No. 22, 2020.
- [88] Liu, L. i dr.: "Evaluating the benefits of Integrating Floating Photovoltaic and Pumped Storage Power System", Energy Conversion and Management, Vol. 194, pp. 173-185, 2019.
- [89] Miao, M. i dr.: "Research on Optimizing Operation of Hybrid PV Power and Pumped Hydro Storage System", Energy Procedia, Vol. 118, pp. 110-118, 2017.
- [90] Xu, X. i dr.: "Optimal Operation of Photovoltaic-Pump Hydro Storage Hybrid System", 2018.
- [91] Mousavi, N. i dr.: "Modelling, design, and experimental validation of a grid-connected farmhouse comprising a photovoltaic and a pumped hydro storage system", Energy Conversion and Management, Vol. 210, pp. 112675, 2020.
- [92] Kocaman, A. S.; Modi, V.: "Value of pumped hydro storage in a hybrid energy generation and allocation system", Applied Energy, Vol. 205, pp. 1202-1215, 2017.
- [93] Margeta, J.; Glasnovic, Z.: "Feasibility of the green energy production by hybrid solar+hydro power system in Europe and similar climate areas", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, No. 6, pp. 1580-1590, 2010.

- [94] Ma, T. i dr.: "Pumped storage-based standalone photovoltaic power generation system: Modeling and techno-economic optimization", *Applied Energy*, Vol. 137, pp. 649-659, 2015.
- [95] Özyön, S.: "Optimal short-term operation of pumped-storage power plants with differential evolution algorithm", *Energy*, Vol. 194, pp. 116866, 2020.
- [96] Braun, S.; Hoffmann, R.: "Intraday Optimization of Pumped Hydro Power Plants in the German Electricity Market", *Energy Procedia*, Vol. 87, pp. 45-52, 2016.
- [97] Zhang, J. i dr.: "Research on calling sequence of peaking regulation means in power system with pumped hydro power (PHP) station", 2017 2nd International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), pp. 543-547, 2017.
- [98] Kazempour, S. J.; Moghaddam, M. P.: "Economic viability of NaS battery plant in a competitive electricity market", 2009 International Conference on Clean Electrical Power, pp. 453-459, 2009.
- [99] Ippolito, M. G. i dr.: "Economic feasibility of a customer-side energy storage in the Italian electricity market", 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), pp. 938-943, 2015.
- [100] Jurković, K.; Pandzić, H.; Kuzle, I.: "Robust unit commitment with large-scale battery storage", 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, pp. 1-5, 2017.
- [101] Almarzooqi, A. i dr.: "Optimizing Operations of Sodium Sulfur (NAS) Large-scale Battery Storage", 2020 IEEE 11th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), pp. 159-163, 2020.
- [102] Kazempour, S. J. i dr.: "Coupling fuel-constrained power plant and NaS battery system for profit increment in a competitive electricity market", 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, pp. 1-9, 2009.
- [103] Nguyen, M. Y.: "A New Battery Energy Storage Charging/Discharging Scheme for Wind Power Producers in Real-Time Markets", *Energies*, Vol. 5, pp. 5439-5452, 2012.
- [104] Akbari-Dibavar, A. i dr.: "Optimal Battery Storage Arbitrage Considering Degradation Cost in Energy Markets", 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pp. 929-934, 2020.
- [105] Daud, M. Z.; Mohamed, A.; Hannan, M. A.: "An improved control method of battery energy storage system for hourly dispatch of photovoltaic power sources", *Energy Conversion and Management*, Vol. 73, pp. 256-270, 2013.
- [106] Mallol-Poyato, R. i dr.: "Optimal discharge scheduling of energy storage systems in MicroGrids based on hyper-heuristics", *Renewable Energy*, Vol. 83, 2015.
- [107] Buiskikh, D. i dr.: "Economic Feasibility of Flow Batteries in Grid-Scale Applications", 2018 15th International Conference on the European Energy Market (EEM), pp. 1-5, 2018.
- [108] Adebayo, A. i dr.: "Economic viability of price arbitrage operation of vanadium redox battery in Alberta's energy market", 2016.
- [109] Turker, B. i dr.: "Utilizing a vanadium redox flow battery to avoid wind power deviation penalties in an electricity market", *Energy Conversion and Management*, Vol. 76, pp. 1150-1157, 2013.

- [110] Lucas, A.; Chondrogiannis, S.: "Smart grid energy storage controller for frequency regulation and peak shaving, using a vanadium redox flow battery", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 80, pp. 26-36, 2016.
- [111] Resch, M. i dr.: "Technical and economic comparison of grid supportive vanadium redox flow batteries for primary control reserve and community electricity storage in Germany", *International Journal of Energy Research*, Vol. 43, No. 1, pp. 337-357, 2019.
- [112] Mufti, M.-U. D. i dr.: "Improved load frequency control with superconducting magnetic energy storage in interconnected power systems", *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 2, pp. 387-397, 2007.
- [113] Kim, A. R. i dr.: "Operating Characteristic Analysis of HTS SMES for Frequency Stabilization of Dispersed Power Generation System", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 20, No. 3, pp. 1334-1338, 2010.
- [114] Nomura, S. i dr.: "Wind farms linked by SMES systems", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 15, No. 2, pp. 1951-1954, 2005.
- [115] Shi, J. i dr.: "Application of SMES in wind farm to improve voltage stability", *Physica C: Superconductivity*, Vol. 468, No. 15, pp. 2100-2103, 2008.
- [116] Leclercq, L.; Robyns, B.; Grave, J.-M.: "Control based on fuzzy logic of a flywheel energy storage system associated with wind and diesel generators", *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 63, No. 3, pp. 271-280, 2003.
- [117] Thatte, A. A.; Zhang, F.; Xie, L.: "Coordination of wind farms and flywheels for energy balancing and frequency regulation", 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-7, 2011.
- [118] Zhang, F. i dr.: "Effective flywheel energy storage (FES) offer strategies for frequency regulation service provision", 2014 Power Systems Computation Conference, pp. 1-7, 2014.
- [119] Lazarewicz, M. L.; Rojas, A.: "Grid frequency regulation by recycling electrical energy in flywheels", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2004., pp. 2038-2042 Vol.2, 2004.
- [120] Hamsic, N. i dr.: "Increasing Renewable Energy Penetration in Isolated Grids Using a Flywheel Energy Storage System", 2007 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, pp. 195-200, 2007.
- [121] Khatami, R.; Oikonomou, K.; Parvania, M.: "Look-Ahead Optimal Participation of Compressed Air Energy Storage in Day-Ahead and Real-Time Markets", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 11, No. 2, pp. 682-692, 2020.
- [122] Khatami, R.; Oikonomou, K.; Parvania, M.: "Optimal Participation of Compressed Air Energy Storage in Energy and Ancillary Service Markets", 2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), pp. 1-5, 2018.
- [123] Nojavan, S. i dr.: "Optimal bidding and offering strategies of merchant compressed air energy storage in deregulated electricity market using robust optimization approach", *Energy*, Vol. 142, pp. 250-257, 2018.
- [124] Shafiee, S. i dr.: "Risk-Constrained Bidding and Offering Strategy for a Merchant Compressed Air Energy Storage Plant", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 32, No. 2, pp. 946-957, 2017.

- [125] Lund, H. i dr.: "Optimal operation strategies of compressed air energy storage (CAES) on electricity spot markets with fluctuating prices", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 5, pp. 799-806, 2009.
- [126] Narayan Dash, S. i dr.: "A robust optimization method for bidding strategy by considering the compressed air energy storage", *Sustainable Cities and Society*, Vol. 48, pp. 101564, 2019.
- [127] Arabkoohsar, A. i dr.: "Thermo-economic analysis and sizing of a PV plant equipped with a compressed air energy storage system", *Renewable Energy*, Vol. 83, 2015.
- [128] Bansal, M.; Dhillon, J.; Virmani, R.: "Development of Operation Strategy for a Solar PV-CAES Based System in Market Scenario", 2016 Second International Conference on Computational Intelligence & Communication Technology (CICT), pp. 362-365, 2016.
- [129] Kahrobaee, S.; Asgarpoor, S.: "Optimum planning and operation of compressed air energy storage with wind energy integration", 2013 North American Power Symposium (NAPS), pp. 1-6, 2013.
- [130] Daneshi, H.; Srivastava, A. K.; Daneshi, A.: "Generation scheduling with integration of wind power and compressed air energy storage", *IEEE PES T&D 2010*, pp. 1-6, 2010.
- [131] Manchester, S.; Swan, L.: "Compressed Air Storage and Wind Energy for Time-of-day Electricity Markets", *Procedia Computer Science*, Vol. 19, pp. 720-727, 2013.
- [132] Abbaspour, M. i dr.: "Optimal operation scheduling of wind power integrated with compressed air energy storage (CAES)", *Renewable Energy*, Vol. 51, pp. 53-59, 2013.
- [133] Akbari, E. i dr.: "Stochastic programming-based optimal bidding of compressed air energy storage with wind and thermal generation units in energy and reserve markets", *Energy*, Vol. 171, pp. 535-546, 2019.
- [134] Foley, A.; Díaz Lobera, I.: "Impacts of compressed air energy storage plant on an electricity market with a large renewable energy portfolio", *Energy*, Vol. 57, pp. 85-94, 2013.
- [135] Sedighzadeh, M.; Esmaili, M.; Mousavi-Taghiabadi, S. M.: "Optimal joint energy and reserve scheduling considering frequency dynamics, compressed air energy storage, and wind turbines in an electrical power system", *Journal of Energy Storage*, Vol. 23, pp. 220-233, 2019.
- [136] Succar, S.; Denkenberger, D. C.; Williams, R. H.: "Optimization of specific rating for wind turbine arrays coupled to compressed air energy storage", *Applied Energy*, Vol. 96, pp. 222-234, 2012.
- [137] Matlab: s Interneta, https://uk.mathworks.com/help/optim/ug/mixed-integer-linear-programming-algorithms.html?searchHighlight=milp%20programming&s_tid=srchtitle_support_results_1_milp%20programming,
- [138] s Interneta, <https://transparency.entsoe.eu/>, 2022.

- [139] Kazempour, S. J. i dr.: "A MIP-based optimal operation scheduling of pumped-storage plant in the energy and regulation markets", 2008 43rd International Universities Power Engineering Conference, pp. 1-5, 2008.
- [140] Kazempour, S. J. i dr.: "Electric energy storage systems in a market-based economy: Comparison of emerging and traditional technologies", *Renewable Energy*, Vol. 34, No. 12, pp. 2630-2639, 2009.
- [141] Chazarra, M.; Pérez-Díaz, J. I.; García-González, J.: "Economic Viability of Pumped-Storage Power Plants Equipped with Ternary Units and Considering Hydraulic Short-Circuit Operation", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 813, No. 1, pp. 012013, 2017.
- [142] Figueiredo, F. C.; Flynn, P. C.: "Using diurnal power price to configure pumped storage", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 21, No. 3, pp. 804-809, 2006.
- [143] Romeo, L. M. i dr.: "Reducing cycling costs in coal fired power plants through power to hydrogen", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 48, pp. 25838-25850, 2020.
- [144] Nalbandian-Sugden, H.: "Operating ratio and cost of coal power generation". 2016, IEA Clean coal centre.
- [145] Hentschel, J.; Babić, U. a.; Spliethoff, H.: "A parametric approach for the valuation of power plant flexibility options", *Energy Reports*, Vol. 2, pp. 40-47, 2016.
- [146] Kumar, M. i dr.: "Power plant cycling costs". 2012, National Renewable energy laboratory.
- [147] Metz, B. i dr.: "Climate change 2007", u *Mitigation of climate change*. 2007.
- [148] "Renewable power generation costs in 2020". 2021, International Renewable Energy Agency.
- [149] Zakeri, B.; Syri, S.: "Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 42, pp. 569-596, 2015.

Životopis

Marin Mandić je rođen 12. siječnja 1994. godine u Splitu. Nakon završene osnovne škole u Donjem Prološcu, upisuje srednju prirodoslovno-matematičku gimnaziju dr. Mate Ujevića u Imotskom. Srednju školu završava 2012. godine.

Sveučilišni preddiplomski studij Elektrotehnike i informacijske tehnologije na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu upisuje 2012. godine. Ovaj studij završava 2015. godine i iste godine se upisuje na sveučilišni diplomski studij Elektrotehnike, smjer Elektroenergetski sustavi, na istom fakultetu. Diplomski studij završava 2017. godine te stječe naziv magistar inženjer elektrotehnike.

Od 1. listopada 2017. godine zaposlen je na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu kao asistent na Katedri za električna postrojenja i sustave. U nastavi je angažiran u izvođenju laboratorijskih vježbi iz sljedećih kolegija: Uvod u organizaciju digitalnih računala, Električna postrojenja, Upravljanje i zaštita električnih postrojenja, Energetski izvori te Elektrane.

Poslijediplomski doktorski studij Elektrotehnike i informacijske tehnologije na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu upisuje u listopadu 2017. godine. Sudjeluje kao istraživač na projektu "Kalibrator nesinusnih veličina i simulator poremećaja u elektroenergetskom sustavu" Hrvatske zaklade za znanost.

Tijekom poslijediplomskog studija, kao glavni autor izradio je i objavio dva znanstvena rada u časopisima kategorije A indeksiranim u WoSCC bazi, jedan znanstveni rad objavljen u zborniku radova s međunarodnog znanstvenog skupa i jedan stručni rad te je kao koautor sudjelovao u izradi i objavljivanju jednog znanstvenog rada kategorije A indeksiranog u WoSCC bazi, te jednog znanstvenog rada objavljenog u zborniku radova s međunarodnog znanstvenog skupa.

Curriculum Vitae

Marin Mandić was born on January 12, 1994 in Split. After completing primary school in Donji Proložac, he enrolled in the high school Natural Science and Mathematics Gymnasium "dr. Mate Ujević" in Imotski. He completed high school in 2012.

In 2012, he enrolled in the undergraduate study program of Electrical Engineering and Information Technology at the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture in Split. He completed this program in 2015, and in the same year he enrolled in the graduate study program of Electrical Engineering, majoring in Electrical Power Systems, at the same faculty. He completed his graduate study in 2017 and obtained the title of Master of Electrical Engineering.

Since October 1, 2017, he has been employed as an assistant at chair of Electrical Substations and Systems at the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Split. In his teaching role, he has been involved in performance of laboratory exercises in the following courses: Introduction to Digital Computer Organization, Electrical Substations, Control and Protection of Electric Power Systems, Energy Sources, and Electrical Power Plants.

He enrolled in the PhD study program in Electrical Engineering and Information Technology at the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Split, in October 2017. He is participating as a researcher on the project "Calibrator of Non-sinusoidal Quantities and Disturbance Simulator in Power Systems," funded by the Croatian Science Foundation.

During his PhD studies, as the main author, he has authored and published two scientific papers in the journals indexed in the WoSCC database, one scientific paper published and presented at international conference and one professional paper. He was also a co-author of one scientific paper indexed in the WoSCC database and one scientific paper published and presented in an international conference.