

# Utjecaj gubitka kapaciteta komponenti na radne parametre samostalnog hibridnog energetskog sustava s obnovljivim izvorima energije

---

Šimunović, Jakov

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:179:571533>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-11**



*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

**Jakov Šimunović**

**UTJECAJ GUBITKA KAPACITETA KOMPONENTI  
NA RADNE PARAMETRE SAMOSTALNOG  
HIBRIDNOG ENERGETSKOG SUSTAVA S  
OBNOVLJIVIM IZVORIMA ENERGIJE**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Split, 2023.



SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**Jakov Šimunović**

*Utjecaj gubitka kapaciteta komponenti na radne parametre  
samostalnog hibridnog energetskeg sustava s obnovljivim  
izvorima energije*

DOKTORSKA DISERTACIJA

Split, 2023.





---

Doktorska disertacija je izrađena na Zavodu za strojarstvo i brodogradnju, Fakulteta elektrotehnike strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Splitu.

Mentor: Prof. dr. sc. Gojmir Radica

Rad br. 189

---

#### PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KRATICU

Ključne riječi: obnovljivi izvori energije; samostalni hibridni energetska sustav; olovno-kiselinska baterija; vodikov podsustav; dinamika gubitka kapaciteta; strategija upravljanja energijom

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Strojarsvo

Znanstvena grana: Procesno-energetsko strojarstvo

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

Mentor rada: Prof. dr. sc. Gojmir Radica

Broj stranica: 179

Broj slika: 131

Broj tablica: 32

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 114

---

---

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:

1. Prof. emer. dr. sc. Frano Barbir, FESB, Split
2. Prof. dr. sc. Sandro Nižetić, FESB, Split
3. Prof. dr. sc. Branko Klarin, FESB, Split
4. Izv. prof. dr. sc. Goran Krajačić, FSB, Zagreb
5. Izv. prof. dr. sc. Zdeslav Jurić, Pomorski fakultet , Split

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:

1. Prof. emer. dr. sc. Frano Barbir, FESB, Split
2. Prof. dr. sc. Sandro Nižetić, FESB, Split
3. Prof. dr. sc. Branko Klarin, FESB, Split
4. Izv. prof. dr. sc. Goran Krajačić, FSB, Zagreb
5. Izv. prof. dr. sc. Zdeslav Jurić, Pomorski fakultet , Split

Disertacija obranjena dana: 22. rujna 2023.



---

# Utjecaj gubitka kapaciteta komponenti na radne parametre samostalnog hibridnog energetskeg sustava s obnovljivim izvorima energije

## Sažetak

U ovom istraživanju je razmatran samostalni hibridni energetskeg sustav sastavljen od PV modula i vjetroturbine za proizvodnju energije, olovno-kiselinske baterije za kratkoročno skladištenje energije i vodikovog podsustava, sastavljenog od PEM elektrolizatora, višestupanjskog kompresora, spremnika vodika i PEM gorivnih članaka, za dugoročno skladištenje energije. Radne performanse sustava su razmatrane za tri različita profila opterećenja i dvije različite strategije upravljanje energijom. Razmatrani profili opterećenja su: konstantan profil opterećenja; stohastički profil opterećenja; impulsni profil opterećenja. U svrhu ovog istraživanja su izrađeni algoritmi za generiranje stohastičkog i impulsnog profila opterećenja. Razmatrane strategije upravljanja energijom su: strategija upravljanja energijom na bazi balansiranja energije unutar sustava; strategija upravljanja energijom na bazi logike petlja dvostruke histereze. Dimenzioniranje sustava je izvršeno višeciljnom optimizacijom korištenjem MATLAB GA Optimization Toolbox-a. Razmatrane su tri funkcije cilja: maksimalna energetska učinkovitost sustava; maksimalna pouzdanost sustava definirana životnim vijekom komponenata; minimalna cijena korisne energije. Za svaku od komponenata sustava je implementiran matematički model radnih karakteristika unutar programskog paketa MATLAB. Za PV modul, olovno-kiselinsku bateriju, PEM elektrolizator i PEM gorivni članak je također implementiran matematički model gubitka kapaciteta. U svrhu ovog istraživanja su razvijeni modeli gubitka kapaciteta PEM elektrolizatora i PEM gorivnih članaka. Za svaku od razmatranih strategija upravljanja energijom je izrađen simulator rada sustava unutar programskog paketa MATLAB, a simulacije rada sustava su izvršene za vremenski period od 20 godina. Rezultati istraživanja su pokazali izravan utjecaj strategija za upravljanje energijom na dinamiku gubitka kapaciteta olovno-kiselinske baterije, PEM elektrolizatora i PEM gorivnih članaka. Nadalje, rezultati su također pokazali potrebe većih kapaciteta pojedinih komponenata u svrhu kompenzacije gubitka kapaciteta.

## Ključne riječi:

obnovljivi izvori energije; samostalni hibridni energetskeg sustav; olovno-kiselinska baterija; vodikov podsustav; dinamika gubitka kapaciteta; strategija upravljanja energijom

---

# **The effect of components capacity loss on the performance parameters of a stand-alone hybrid energy system with renewable energy sources**

## **Abstract**

In this study, a stand-alone hybrid renewable energy system composed of a PV module and a wind turbine for energy production, a lead-acid battery for short-term energy storage, and a hydrogen subsystem consisting of a PEM electrolyzer, a multi-stage compressor, a hydrogen tank, and PEM fuel cells, for long-term energy storage was considered. The system's operating performance was evaluated for three different end-user load profiles and two different energy management strategies. Considered load profiles are: constant load profile; stochastic load profile; impulse load profile. For this research, algorithms were developed for generating stochastic and impulse load profiles. The considered energy management strategies are: energy management strategy based on energy balancing within the system; energy management strategy based on double hysteresis loop logic. System sizing was performed by multi-objective optimization using the MATLAB GA Optimization Toolbox. Three objective functions were considered: maximum system energy efficiency; maximum system reliability defined by the component's lifetime; minimum levelised cost of energy. A mathematical model of operating characteristics has been implemented within the MATLAB software package for each system component. A mathematical capacity loss model was also implemented for the PV module, lead-acid battery, PEM electrolyzer, and PEM fuel cell. For this research, capacity loss models of PEM electrolyzers and PEM fuel cells were developed. For each of the considered energy management strategies, a system operation simulator was created within the MATLAB software package, and the system operation simulations were performed for a 20 years time period. The research results showed a direct impact of energy management strategies on the capacity loss dynamics of lead-acid batteries, PEM electrolyzers, and PEM fuel cells. Furthermore, the results also showed the need for higher capacities of individual components in order to compensate for the loss of capacity.

## **Keywords:**

renewable energy sources; stand-alone hybrid energy system; lead-acid battery; hydrogen subsystem; component capacity loss dynamics; energy management strategy

---

## **Zahvale**

*Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Gojmiru Radici na strpljenju i susretljivosti, te jednom divnom prijateljskom odnosu kroz sve ove godine suradnje u izradi ove doktorske disertacije.*

*Zahvaljujem se i prof. emer. dr. sc. Frani Barbiru na svim savjetima, strpljenju i pristupačnosti, te svom izdvojenom vremenu prilikom pisanja i objavljivanja znanstvenih radova i izradi ove doktorske disertacije.*

*Želio bih se zahvaliti svim članovima Povjerenstva za ocjenu i obranu doktorske disertacije na izdvojenom vremenu, te korisnim savjetima i prijedlozima prilikom izrade i obrane ove disertacije.*

*Hvala svim mojim dragim prijateljima i kolegama, iz „vječno prometnog“ ureda C506, na svim savjetima i uvijek ugodnoj prijateljskoj atmosferi.*

*Posebno zahvaljujem svojim dragim roditeljima i bratu na beskrajnoj ljubavi, povjerenju, strpljenju, te neizmjerne potpori, kako kroz cijeli život, tako i za vrijeme pisanja ove disertacije.*

*Za kraj, neizmjereno hvala na silnoj motivaciji, strpljenju, najvećoj potpori i osloncu za vrijeme pisanja ove disertacije, mojoj ljubavi Zrinki.*

## Sadržaj

Sažetak.....	iv
Abstract.....	v
Sadržaj .....	vii
Popis tablica.....	x
Popis slika.....	xii
Popis kratica .....	xviii
Popis oznaka.....	xx
1. UVOD.....	1
1.1. Hipoteza.....	3
1.2. Metodologija istraživanja .....	4
1.3. Znanstveni doprinos .....	6
1.4. Struktura rada .....	6
2. PREGLED LITERATURE .....	8
2.1. Simuliranje rada samostalnih hibridnih energetske sustava.....	8
2.1.1. Određivanje životnog vijeka baterije.....	10
2.1.2. Određivanje životnog vijeka elektrolizatora i gorivnih članaka.....	13
2.1.3. Pregled istraživanja.....	14
2.2. Dimenzioniranje samostalnih hibridnih energetske sustava .....	19
2.2.1. Konvencionalne metode dimenzioniranja .....	20
2.2.2. Dimenzioniranje pretraživanjem zadanog polja .....	20
2.2.3. Dimenzioniranje korištenjem programskih alata.....	20
2.2.4. Dimenzioniranje korištenjem algoritama umjetne inteligencije.....	22
2.2.5. Pregled istraživanje.....	24
2.3. Strategije upravljanja energijom unutar samostalnih hibridnih energetske sustava ...	33
2.3.1. Pregled istraživanja.....	36
2.4. Zaključak .....	45

---

3. MODELIRANJE KOMPONENTI SAMOSTALNOG HIBRIDNOG ENERGETSKOG SUSTAVA .....	47
3.1. Ulazni podaci o vremenskim uvjetima.....	49
3.1.1. Solarna energija.....	50
3.1.2. Energija vjetra .....	53
3.2. Profil opterećenja krajnjeg korisnika .....	55
3.2.1. Konstantan profil opterećenja .....	55
3.2.2. Stohastički profil opterećenja.....	55
3.2.3. Impulsni profil opterećenja .....	57
3.3. Fotonaponski modul.....	58
3.4. Vjetroturbina .....	59
3.5. Olovno-kiselinska baterija .....	60
3.5.1. Model dinamike gubitka kapaciteta olovno-kiselinske baterije.....	61
3.6. PEM elektrolizator .....	67
3.7. PEM gorivni članak .....	73
3.8. Spremnik vodika .....	77
3.9. Višestupanjski klipni kompresor.....	79
4. STRATEGIJA UPRAVLJANJA ENERGIJOM .....	80
4.1. Strategija upravljanja energijom na temelju energetske bilance.....	80
4.2. Strategija upravljanja energijom bazirana na logici petlji dvostruke histereze .....	81
5. DIMENZIONIRANJE SUSTAVA.....	84
5.1. Varijable optimizacije i ograničenja .....	85
5.2. Funkcije cilja.....	88
5.2.1. Učinkovitost sustava .....	88
5.2.2. Pouzdanost .....	89
5.2.3. Cijena energije .....	90
6. REZULTATI I DISKUSIJA .....	94

6.1. Rezultati simulacija i dimenzioniranja .....	94
6.1.1. Rezultati razmatranog slučaja A-1 .....	96
6.1.2. Rezultati razmatranog slučaja A-2 .....	101
6.1.3. Rezultati razmatranog slučaja A-3 .....	106
6.1.4. Rezultati razmatranog slučaja B-1.....	111
6.1.5. Rezultati razmatranog slučaja B-2.....	117
6.1.6. Rezultati razmatranog slučaja B-3.....	122
6.2. Diskusija .....	128
7. ZAKLJUČAK.....	134
7.1. Buduća istraživanja.....	135
Literatura .....	136
Životopis.....	144
Curriculum vitae .....	145

**Popis tablica**

Tablica 2.1: Pregled korištenih matematičkih modela HRES komponenata .....	9
Tablica 2.2: Pregled programskih paketa/alata, razmatranih profila opterećenja, vremenskih perioda i metoda za određivanje životnog vijeka komponenata sustava .....	15
Tablica 2.3: Pregled metoda dimenzioniranja i funkcija cilja .....	30
Tablica 2.4: Pregled korištenih strategija upravljanja energijom .....	43
Tablica 3.1: Albedo vrijednosti za različite tipove površina .....	53
Tablica 3.2: Vrijednosti visine hrapavosti terena za različite tipove terena .....	54
Tablica 3.3: Parametri radne karakteristike PV modula .....	59
Tablica 3.4: Radne karakteristike relativne vjetroturbine .....	60
Tablica 3.5: Pregled konstantnih vrijednosti koeficijenata .....	67
Tablica 3.6: Pregled tehničkih specifikacija 10 OPzS1000 baterije .....	67
Tablica 3.7: Ključni parametri polarizacijske krivulje na početku i na kraju životnog vijeka članka PEM elektrolizatora .....	70
Tablica 3.8: Ključni parametri PEM FC polarizacijske krivulje na početku i na kraju životnog vijeka .....	74
Tablica 5.1: Varijable optimizacije i rubni uvjeti pretraživanja .....	86
Tablica 5.2: Pregled ekonomskih parametara .....	92
Tablica 6.1: Prikaz kriterija izbora Pareto rješenja za razmatrani slučaj A-1 .....	96
Tablica 6.2: Prikaz rezultata dimenzioniranja izabranih rješenja za razmatrani slučaj A-1 ....	97
Tablica 6.3: Ključni pokazatelji performansi rada HRES-a za razmatrani slučaj A-1 .....	100
Tablica 6.4: Prikaz kriterija izbora Pareto rješenja za razmatrani slučaj A-2 .....	101
Tablica 6.5: Prikaz rezultata dimenzioniranja izabranih rješenja za razmatrani slučaj A-2 ..	102
Tablica 6.6: Ključni pokazatelji performansi rada HRES-a za razmatrani slučaj A-2 .....	105
Tablica 6.7: Prikaz kriterija izbora Pareto rješenja za razmatrani slučaj A-3 .....	106
Tablica 6.8: Prikaz rezultata dimenzioniranja izabranih rješenja za razmatrani slučaj A-3 ..	107
Tablica 6.9: Ključni pokazatelji performansi rada HRES-a za razmatrani slučaj A-3 .....	111
Tablica 6.10: Prikaz kriterija izbora Pareto rješenja za razmatrani slučaj B-1 .....	112

Tablica 6.11: Prikaz rezultata dimenzioniranja izabranih rješenja za razmatrani slučaj B-1 .	113
Tablica 6.12: Ključni pokazatelji performansi rada HRES-a za razmatrani slučaj B-1 .....	116
Tablica 6.13: Prikaz kriterija izbora Pareto rješenja za razmatrani slučaj B-2.....	117
Tablica 6.14: Prikaz rezultata dimenzioniranja izabranih rješenja za razmatrani slučaj B-2.	118
Tablica 6.15: Ključni pokazatelji performansi rada HRES-a za razmatrani slučaj B-2 .....	122
Tablica 6.16: Prikaz kriterija izbora Pareto rješenja za razmatrani slučaj B-3.....	123
Tablica 6.17: Prikaz rezultata dimenzioniranja izabranih rješenja za razmatrani slučaj B-3.	124
Tablica 6.18: Ključni pokazatelji performansi rada HRES-a za razmatrani slučaj B-3 .....	128



**Popis slika**

Slika 1.1: Različite konfiguracije samostalnih hibridnih energetske sustava.....	3
Slika 1.2: Mogući tokovi energije unutar samostalnog energetske sustava: a) strategija upravljanja energijom bazirana na balansiranju energije unutar sustava; b) strategija upravljanja energijom bazirana na logici dvostrukih histereza.....	5
Slika 2.1: Primjer krivulje očekivanog broja ciklusa punjenja i pražnjenja do kraja životnog vijeka baterije u ovisnosti o dubini pražnjenja baterije.....	12
Slika 2.2: Omjer korištenja optimizacijskih AI algoritama u svrhu dimenzioniranja HRES-a [75].....	23
Slika 2.3: Omjer korištenih funkcija cilja u svrhu dimenzioniranja HRES-a [75] .....	24
Slika 2.4: Dijagram toka hibridnog GA-SA algoritma [81].....	26
Slika 2.5: Dijagram toka procesa optimizacije [70].....	27
Slika 2.6: Dijagram toka hibridnog MOEA-GA algoritma [60].....	28
Slika 2.7: EMS-1 dijagram toka.....	34
Slika 2.8: Dijagrami toka EMS: a) prva EMS; b) druga EMS; c) treća EMS [46].....	37
Slika 2.9: Dijagram toka EMS Dash i Bajpai [24].....	38
Slika 2.10: Dijagram upravljanja petlji dvostrukih histereza [33] .....	39
Slika 2.11: Dijagram upravljanja petlji histereza: a) prva EMS; b) druga EMS [57].....	39
Slika 2.12: Dijagram upravljanja i odabir režima rada [27] .....	40
Slika 2.13: Shema logike upravljanja korištenjem fuzzy logike [25] .....	42
Slika 2.14: EMS hijerarhijske strukture upravljanja [28] .....	42
Slika 3.1: Shematski prikaz razmatranog HRES-a .....	47
Slika 3.2: Srednja dnevna ozračenost horizontalne plohe, lokacija Split, Hrvatska.....	49
Slika 3.3: Histogram brzine vjetrova za visinu mjerenja od 10 metara, lokacija Split, Hrvatska	49
Slika 3.4: Položaj Sunca na Zemlji opisan kutom zemljopisne širine, satnim kutom Sunca i deklinacijom Sunca .....	50
Slika 3.5: Sunčevo zračenje na nagnutu plohu .....	51
Slika 3.6: Dijagram toka algoritma za generiranje stohastičkog profila opterećenja .....	56

Slika 3.7: Primjer stohastičkog profila opterećenja za vremenski period od jednog tjedna.....	56
Slika 3.8: Dijagram toka algoritma za generiranje impulsnog profila opterećenja .....	57
Slika 3.9: Primjer impulsnog profila opterećenja za vremenski period od jednog tjedna.....	58
Slika 3.10: Prosječne mjesečne energetske potrebe impulsnog profila opterećenja .....	58
Slika 3.11: Funkcija pada učinkovitosti PV modula .....	59
Slika 3.12: Krivulja relativne snage vjetroturbine u ovisnosti o brzini vjetra.....	60
Slika 3.13: Prirast broja loših punjenja u ovisnosti o stanju napunjenosti baterije .....	63
Slika 3.14: Brzina stvaranja korozivnog sloja u funkciji napona .....	66
Slika 3.15: Radna karakteristika PEM elektrolizatora na početku i na kraju životnog vijeka .	70
Slika 3.16: Krivulja učinkovitosti PEM elektrolizator uređaja u ovisnosti o relativnoj snazi na početku i na kraju životnog vijeka.....	70
Slika 3.17: Prirast napona uslijed degradacije PEM elektrolizatora u ovisnosti o gustoći struje .....	71
Slika 3.18: Dijagram toka procesa degradacije PEM elektrolizatora .....	72
Slika 3.19: Radna karakteristika PEM gorivnog članka na početku i na kraju životnog vijeka .....	75
Slika 3.20: Krivulja učinkovitosti PEM FC uređaja u ovisnosti o relativnoj snazi na početku i na kraju životnog vijeka .....	75
Slika 3.21: Stopa degradacije PEM gorivnog članka u ovisnosti o gustoći struje.....	76
Slika 3.22: Dijagram toka procesa degradacije PEM FC-a .....	77
Slika 3.23: Razlika skladištenja idealnog i realnog vodika pod visokim tlakom u 50 litrenoj industrijskoj plinskoj boci .....	78
Slika 3.24: Koeficijent kompresibilnosti vodika u ovisnosti o tlaku i temperaturi .....	78
Slika 4.1: Dijagram toka logike upravljanja EMS-A .....	81
Slika 4.2: Petlje upravljanja dvostruke histereze.....	82
Slika 4.3: Dijagram toka logike upravljanja EMS-B.....	83
Slika 5.1: Koncept Pareto granice višeciljne optimizacije prema tri funkcije cilja.....	85
Slika 5.2: Prikaz raspona cijene PV modula .....	91

---

Slika 5.3: Prikaz raspona cijene vjetroturbine .....	91
Slika 6.1: Dijagram toka simulatora rada HRES-a .....	95
Slika 6.2: Pareto granica optimalnih rješenja za razmatrani slučaj A-1 .....	96
Slika 6.3: Godišnja distribucija proizvedene energije za razmatrani slučaj A-1 .....	97
Slika 6.4: Neiskorištena energije, razmatrani slučaj A-1 .....	97
Slika 6.5: Ciklusi punjenja i pražnjenja baterije i dinamika proizvodnje i potrošnje vodika za razmatrani slučaj A-1 .....	98
Slika 6.6: Dinamika gubitka kapaciteta baterije, razmatrani slučaj A-1 .....	98
Slika 6.7: Dinamika prirasta težinskog broja ciklusa pražnjenja, razmatrani slučaj A-1 .....	98
Slika 6.8: Dinamika faktora stanja napunjenosti baterije, razmatrani slučaj A-1 .....	99
Slika 6.9: Dinamika faktora struje, razmatrani slučaj A-1 .....	99
Slika 6.10: Dinamika prirasta broja loših punjenja baterije, razmatrani slučaj A-1 .....	99
Slika 6.11: Dinamika faktora kiselinske stratifikacije, razmatrani slučaj A-1 .....	99
Slika 6.12: Dinamika prirasta efektivne debljine korozivnog sloja, razmatrani slučaj A-1 ....	99
Slika 6.13: Dinamika rada elektrolizatora i gorivnog članka, razmatrani slučaj A-1 .....	100
Slika 6.14: Dinamika gubitka kapaciteta elektrolizatora i gorivnog članka, razmatrani slučaj A-1 .....	100
Slika 6.15: Pareto granica optimalnih rješenja za razmatrani slučaj A-2 .....	101
Slika 6.16: Godišnja distribucija proizvedene energije za razmatrani slučaj A-2 .....	102
Slika 6.17: Neiskorištena energije, razmatrani slučaj A-2 .....	102
Slika 6.18: Ciklusi punjenja i pražnjenja baterije i dinamika proizvodnje i potrošnje vodika za razmatrani slučaj A-2 .....	103
Slika 6.19: Dinamika gubitka kapaciteta baterije, razmatrani slučaj A-2 .....	103
Slika 6.20: Dinamika prirasta težinskog broja ciklusa pražnjenja, razmatrani slučaj A-2 ....	103
Slika 6.21: Dinamika faktora stanja napunjenosti baterije, razmatrani slučaj A-2 .....	104
Slika 6.22: Dinamika faktora struje, razmatrani slučaj A-2 .....	104
Slika 6.23: Dinamika prirasta broja loših punjenja baterije, razmatrani slučaj A-2 .....	104
Slika 6.24: Dinamika faktora kiselinske stratifikacije, razmatrani slučaj A-2 .....	104

Slika 6.25: Dinamika prirasta efektivne debljine korozivnog sloja, razmatrani slučaj A-2...	104
Slika 6.26: Dinamika rada elektrolizatora i gorivnog članka, razmatrani slučaj A-2 .....	105
Slika 6.27: Dinamika gubitka kapaciteta elektrolizatora i gorivnog članka, razmatrani slučaj A-2 .....	105
Slika 6.28: Pareto granica optimalnih rješenja za razmatrani slučaj A-3 .....	106
Slika 6.29: Godišnja distribucija proizvedene energije za razmatrani slučaj A-3 .....	108
Slika 6.30: Neiskorištena energije, razmatrani slučaj A-3 .....	108
Slika 6.31: Ciklusi punjenja i pražnjenja baterije i dinamika proizvodnje i potrošnje vodika za razmatrani slučaj A-3 .....	108
Slika 6.32: Dinamika gubitka kapaciteta baterije, razmatrani slučaj A-3 .....	109
Slika 6.33: Dinamika prirasta težinskog broja ciklusa pražnjenja, razmatrani slučaj A-3 .....	109
Slika 6.34: Dinamika faktora stanja napunjenosti baterije, razmatrani slučaj A-3 .....	109
Slika 6.35: Dinamika faktora struje, razmatrani slučaj A-3 .....	109
Slika 6.36: Dinamika prirasta broja loših punjenja baterije, razmatrani slučaj A-3 .....	110
Slika 6.37: Dinamika faktora kiselinske stratifikacije, razmatrani slučaj A-3 .....	110
Slika 6.38: Dinamika prirasta efektivne debljine korozivnog sloja, razmatrani slučaj A-3 ...	110
Slika 6.39: Dinamika rada elektrolizatora i gorivnog članka, razmatrani slučaj A-3 .....	110
Slika 6.40: Dinamika gubitka kapaciteta elektrolizatora i gorivnog članka, razmatrani slučaj A-3 .....	111
Slika 6.41: Pareto granica optimalnih rješenja za razmatrani slučaj B-1 .....	112
Slika 6.42: Godišnja distribucija proizvedene energije za razmatrani slučaj B-1 .....	113
Slika 6.43: Neiskorištena energije, razmatrani slučaj B-1 .....	113
Slika 6.44: Ciklusi punjenja i pražnjenja baterije i dinamika proizvodnje i potrošnje vodika za razmatrani slučaj B-1 .....	114
Slika 6.45: Dinamika gubitka kapaciteta baterije, razmatrani slučaj B-1 .....	114
Slika 6.46: Dinamika prirasta težinskog broja ciklusa pražnjenja, razmatrani slučaj B-1 .....	115
Slika 6.47: Dinamika faktora stanja napunjenosti baterije, razmatrani slučaj B-1 .....	115
Slika 6.48: Dinamika faktora struje, razmatrani slučaj B-1 .....	115

---

Slika 6.49: Dinamika prirasta broja loših punjenja baterije, razmatrani slučaj B-1 .....	115
Slika 6.50: Dinamika faktora kiselinske stratifikacije, razmatrani slučaj B-1 .....	115
Slika 6.51: Dinamika prirasta efektivne debljine korozivnog sloja, razmatrani slučaj B-1... ..	115
Slika 6.52: Dinamika rada elektrolizatora i gorivnog članka, razmatrani slučaj B-1 .....	116
Slika 6.53: Dinamika gubitka kapaciteta elektrolizatora i gorivnog članka, razmatrani slučaj B-1 .....	116
Slika 6.54: Pareto granica optimalnih rješenja za razmatrani slučaj B-2.....	117
Slika 6.55: Godišnja distribucija proizvedene energije za razmatrani slučaj B-2 .....	118
Slika 6.56: Neiskorištena energije, razmatrani slučaj B-2 .....	119
Slika 6.57: Ciklusi punjenja i pražnjenja baterije i dinamika proizvodnje i potrošnje vodika za razmatrani slučaj B-2 .....	119
Slika 6.58: Dinamika gubitka kapaciteta baterije, razmatrani slučaj B-2.....	120
Slika 6.59: Dinamika prirasta težinskog broja ciklusa pražnjenja, razmatrani slučaj B-2.....	120
Slika 6.60: Dinamika faktora stanja napunjenosti baterije, razmatrani slučaj B-2 .....	120
Slika 6.61: Dinamika faktora struje, razmatrani slučaj B-2 .....	120
Slika 6.62: Dinamika prirasta broja loših punjenja baterije, razmatrani slučaj B-2 .....	120
Slika 6.63: Dinamika faktora kiselinske stratifikacije, razmatrani slučaj B-2.....	121
Slika 6.64: Dinamika prirasta efektivnog korozivnog sloja, razmatrani slučaj B-2 .....	121
Slika 6.65: Dinamika rada elektrolizatora i gorivnog članka, razmatrani slučaj B-2 .....	121
Slika 6.66: Dinamika gubitka kapaciteta elektrolizatora i gorivnog članka, razmatrani slučaj B-2.....	121
Slika 6.67: Pareto granica optimalnih rješenja za razmatrani slučaj B-3.....	123
Slika 6.68: Godišnja distribucija proizvedene energije za razmatrani slučaj B-3 .....	124
Slika 6.69: Neiskorištena energije, razmatrani slučaj B-3 .....	125
Slika 6.70: Ciklusi punjenja i pražnjenja baterije i dinamika proizvodnje i potrošnje vodika za razmatrani slučaj B-3 .....	125
Slika 6.71: Dinamika gubitka kapaciteta baterije, razmatrani slučaj B-3 .....	126
Slika 6.72: Dinamika prirasta težinskog broja ciklusa pražnjenja, razmatrani slučaj B-3.....	126

Slika 6.73: Dinamika faktora stanja napunjenosti baterije, razmatrani slučaj B-3.....	126
Slika 6.74: Dinamika faktora struje, razmatrani slučaj B-3 .....	126
Slika 6.75: Dinamika prirasta broja loših punjenja baterije, razmatrani slučaj B-3.....	126
Slika 6.76: Dinamika faktora kiselinske stratifikacije, razmatrani slučaj B-3 .....	127
Slika 6.77: Dinamika prirasta efektivnog korozivnog sloja, razmatrani slučaj B-3.....	127
Slika 6.78: Dinamika rada elektrolizatora i gorivnog članka, razmatrani slučaj B-3.....	127
Slika 6.79: Dinamika gubitka kapaciteta elektrolizatora i gorivnog članka, razmatrani slučaj B-3 .....	127
Slika 6.80: Distribucija proizvedene energije .....	129
Slika 6.81: Instalirani proizvodni kapacitet.....	129
Slika 6.82: Raspodjela inicijalnih kapitalnih troškova .....	130
Slika 6.83: Srednje radno vrijeme elektrolizatora i gorivnih članaka po ciklusu uključivanja .....	131
Slika 6.84: Godišnja distribucija radnih sati elektrolizatora za: a) slučaj A-1; b) slučaj A-2; c) slučaj A-3; d) slučaj B-1; e) slučaj B-2; f) slučaj B-3 .....	132
Slika 6.85: Godišnja distribucija radnih sati gorivnog članka za: a) slučaj A-1; b) slučaj A-2; c) slučaj A-3; d) slučaj B-1; e) slučaj B-2; f) slučaj B-3 .....	133

**Popis kratica**

A-1	razmatrani slučaj za strategiju upravljanja energijom prema logici balansiranja energije unutar sustava i konstantan profil opterećenja
A-2	razmatrani slučaj za strategiju upravljanja energijom prema logici balansiranja energije unutar sustava i stohastički profil opterećenja
A-3	razmatrani slučaj za strategiju upravljanja energijom prema logici balansiranja energije unutar sustava i impulsni profil opterećenja
ABC	umjetna kolonija pčela ( <i>engl. Artificial Bee Colony</i> )
AC	izmjenična struja ( <i>engl. Alternating Current</i> )
ACO	optimizacija kolonijom mrava ( <i>engl. Ant Colony Optimization</i> )
AI	umjetna inteligencija ( <i>engl. Artificial Intelligence</i> )
B-1	razmatrani slučaj za strategiju upravljanja energijom prema logici petlje dvostruke histereze i konstantan profil opterećenja
B-2	razmatrani slučaj za strategiju upravljanja energijom prema logici petlje dvostruke histereze i stohastički profil opterećenja
B-3	razmatrani slučaj za strategiju upravljanja energijom prema logici petlje dvostruke histereze i impulsni profil opterećenja
BCA	algoritam grananja i rezanja ( <i>engl. Branch-and-Cut Algorithm</i> )
BM	bio masa
BoL	početak životnog vijeka ( <i>engl. Beginning of Life</i> )
BSA	algoritam strategije povlačenja ( <i>engl. Backtracking Search Algorithm</i> )
BT	baterija
CS	pretraživanje kukavicom ( <i>engl. Cuckoo Search</i> )
DC	istosmjerna struja ( <i>engl. Direct Current</i> )
DE	diferencijalna evolucija ( <i>engl. Differential Evolution</i> )
DG	diesel generator
EL	elektrolizator
EMS	strategija upravljanja energijom ( <i>engl. Energy Management Strategy</i> )
EMS-1	osnovna strategija upravljanja energijom
EMS-A	strategija upravljanja energijom prema logici balansiranja energije unutar sustava

EMS-B	strategija upravljanja energijom prema logici petlje dvostruke histereze
EoL	kraj životnog vijeka ( <i>engl. End of Life</i> )
FC	gorivni članak ( <i>engl. Fuel Cell</i> )
GA	genetski algoritam ( <i>engl. Genetic Algorithm</i> )
GWO	optimizator sivi vuk ( <i>engl. Grey Wolf Optimizer</i> )
HP	hidroturbina ( <i>engl. Hydro Power Plant, HP</i> )
HRES	samostalni hibridni energetske sustavi u sprezi s obnovljivim izvorima energije ( <i>engl. Hybrid Renewable Energy System</i> )
HS	vodikov podsustav ( <i>engl. Hydrogen System</i> )
HSA	algoritam harmonijskog pretraživanja ( <i>engl. Harmony Search Algorithm</i> )
IEC	međunarodna elektrotehnička komisija ( <i>engl. International Electrotechnical Commission</i> )
MPC	model prediktivne kontrole ( <i>engl. Model Predictive Control</i> )
MPPT	praćenje točke maksimalne snage ( <i>engl. Maximum Power Point Tracking</i> )
OIE	obnovljivi izvori energije
PEM	polimerna membrana ( <i>engl. Polymer Electrolyte Membrane ili Proton Exchange Membrane</i> )
PP	metoda pretraživanjem zadanog polja (PP)
PSO	optimizacija rojem čestica ( <i>engl. Particle Swarm Optimization</i> )
PV	fotonaponski modul ( <i>engl. Photovoltaic module</i> )
SA	simulirano žarenje ( <i>engl. Simulated Annealing</i> )
SDO	( <i>engl. Simulink Design Optimization</i> )
SMCS	( <i>engl. State Machine Control Strategy</i> )
SoC	stanja napunjenosti ( <i>engl. State of Charge</i> )
SPEA	( <i>engl. Strength Pareto Evolutionary Algorithm</i> )
WHO	optimizator divlji konj ( <i>engl. Wild Horse Optimizer</i> )
WT	vjetroturbina ( <i>engl. Wind Turbine</i> )



**Popis oznaka**

$A$	površina
$A_{PV}$	efektivna površina PV modula
$A_{WT}$	efektivna površina rotora vjetroturbine
$ALC$	godišnji troškovi životnog ciklusa ( <i>engl. Annualized Life Cycle Cost</i> )
$A_{0,BB}$	Beattie-Bridgeman-ova konstanta vodika
$a$	promjenjivi faktor idealnosti
$a_{BB}$	Beattie-Bridgeman-ova konstanta vodika
$a_{VdW}$	specifični Van der Waals parametar vodika
$B_{0,BB}$	Beattie-Bridgeman-ova konstanta vodika
$b$	Tafelov broj
$b_{BB}$	Beattie-Bridgeman-ova konstanta vodika
$b_{VdW}$	specifični Van der Waals parametar vodika
$C_{10}$	kapacitet baterije za 10 satno pražnjenje
$C_{BT}$	preostali kapacitet baterije
$C_{BT}^{EOL}$	preostali kapacitet baterije na kraju životnog vijeka
$C_{BT,r}$	nazivni kapacitet baterije
$C_c$	normalizirani kapacitet punjenja
$C_d$	normalizirani kapacitet pražnjenja
$C_{deg}$	gubitak kapaciteta baterije izazvan mehanizmom degradacije aktivne mase
$C_{kor}$	gubitak kapaciteta baterije izazvan mehanizmom korozije
$C_{n_p}^{BoL}$	kapacitet komponente sustava na početku životnog vijeka
$C_{n_p}^{EOL}$	kapacitet komponente sustava na kraju životnog vijeka
$C_{n_p}^{ng}$	kapacitet komponente sustava na kraju razmatranog vremenskog perioda
$C_p$	koeficijent snage vjetroturbine
$CC_{n_p}$	kapitalni trošak razmatrane komponente sustava
$CF_x$	broj ciklusa do kraja životnog vijeka baterije ( <i>engl. Cycle to Failure</i> )
$CRF$	faktor povrata kapitala ( <i>engl. Capital Recovery Factor</i> )

$c_{BB}$	Beattie-Bridgeman-ova konstanta vodika
$c_{dif}$	efektivna difuzijska konstanta
$c_{SoC,0}$	konstanta prirasta faktora stanja napunjenosti baterije pri $SoC_{BT} = 0$
$c_{SoC,min}$	konstanta prirasta faktora stanja napunjenosti baterije pri $SoC_{BT,min}$
$c_S$	stupanj kompresije
$c_T$	temperaturni koeficijent struje stvaranja plinova
$c_U$	naponski koeficijent struje stvaranja plinova
$DoD_{BT}$	aktivna dubina pražnjenja baterije
$d$	godišnja kamatna stopa
$E_{BT}^{in}$	ukupna inicijalna energija kojom baterija doprinosi u sustav na početku životnog vijeka
$E_b$	udio izravnog Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu
$E_{b,\beta}$	izravno Sunčevo zračenja na nagnutu plohu
$E_d$	udio raspršenog Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu
$E_{d,\beta}$	raspršeno Sunčevo zračenja na nagnutu plohu
$E_g$	Sunčevo zračenje na horizontalnu plohu
$E_{H_2}^{in}$	inicijalna energetska vrijednost vodika na početku razmatranog vremenskog perioda
$E_o$	solarna konstanta, $1.36 \text{ kW/m}^2$
$E_{oh}$	ekstraterestičko Sunčevo zračenja na horizontalnu plohu
$E_{r,\beta}$	reflektirajuće Sunčevo zračenja od okoline koje dopire do nagnute plohe
$E_\beta$	ukupno Sunčevo zračenje na nagnutu plohu
$EL_{low}$	stanje napunjenosti baterije za isključivanje elektrolizatora
$EL_{up}$	stanje napunjenosti baterije za uključivanje elektrolizatora
$F$	Faraday-eva konstanta
$FC_{low}$	stanje napunjenosti baterije za uključivanje gorivnog članka
$FC_{up}$	stanje napunjenosti baterije za isključivanje gorivnog članka
$f$	funkcija cilja optimizacije
$f_{acid}$	faktor utjecaja kiselinske stratifikacije na degradaciju aktivne mase

---

$f_I$	faktor struje
$f_{minus}$	faktora opadanja stratifikacije
$f_{minus,diff}$	faktora opadanja stratifikacije uslijed difuzije
$f_{minus,gass}$	faktora opadanja stratifikacije uslijed stvaranja plinova
$f_{plus}$	faktora prirasta stratifikacije
$f_{PV}$	faktor smanjenja
$f_{SoC}$	faktor stanja napunjenosti baterije
$f_{strat}$	faktor stratifikacije
$g$	ograničenje optimizacije
$g_c$	konstanta proporcionalnosti elektrolita punjenja
$g_d$	konstanta proporcionalnosti elektrolita pražnjenja
$HHV$	gornju ogrjevnu moć vodika ( <i>engl. High Heating Value</i> )
$h_{BT}$	visina baterije
$I_{10}$	jakost struje potrebna za 10 satno pražnjenje baterije
$I_{BT}$	struja punjenja/pražnjenja baterije
$I_{EL}$	struja elektrolizatora
$I_{gas}$	normalizirana struja stvaranja plinova
$I_{gas,0}$	inicijalna vrijednost normalizirane struje stvaranja plinova
$I_L$	fotostruja
$I_{PV}$	struja fotonaponskog modula
$I_0$	struja zasićenja
$ICC$	inicijalni kapitalni troškovi ( <i>engl. Initial Capital Cost</i> )
$i$	gustoća struje
$i_L$	gustoća struje ograničenja
$i_{loss}$	gustoća struje parazitskih gubitaka struje i vodika
$i_o$	gustoća struje izmjene
$J$	ukupan broj sati razmatranog vremenskog perioda
$K_d$	koeficijent udjela raspršenog Sunčevog zračenja u ukupnom Sunčevom zračenju
$K_T$	indeks prozračnosti

$k$	brzina stvaranja korozivnog sloja
$k_L$	marginalni koeficijent intenziteta opterećenja
$k_m$	marginalni koeficijenti pretraživanja
$k_s$	parametar brzine stvaranja korozivnog sloja
$k_{s,lim}$	granični parametar brzine stvaranja korozivnog sloja
$L_{BT}^{float}$	životni vijek baterije definiran od strane proizvođače ( <i>engl. Float Lifetime</i> )
$L_{EL}$	životni vijek elektrolizatora
$L_{EL}^{sys}$	životni vijek elektrolizator uređaja
$L_{EL}$	životni vijek gorivnog članka
$L_{FC}^{sys}$	životni vijek FC uređaja
$\bar{L}_{n_p}$	prosječni životni vijek komponente sustava
$LCOE$	normalizirana cijena korisne energije ( <i>engl. Levelized Cost of Energy</i> )
$LoPP$	faktor zadovoljavanja potreba krajnjeg korisnika ( <i>engl. Loss of Power Probability</i> )
$M_c$	koeficijent prenapona prijenosa naboja prilikom punjenja
$M_d$	koeficijent prenapona prijenosa naboja prilikom pražnjenja
$m$	ukupni broj raspona dubine pražnjenja
$m_{H_2}$	ukupna masa skladištenog vodika
$\dot{m}_{H_2}$	maseni protok komprimiranog vodika
$\dot{m}_{EL,r}^{BoL}$	maseni protok proizvedenog vodika u nazivnoj radnoj točki elektrolizatora na početku životnog vijeka
$\dot{m}_{EL,r}^{EoL}$	maseni protok proizvedenog vodika u nazivnoj radnoj točki elektrolizatora na kraju životnog vijeka
$NOCT$	nominalna radna temperatura ćelije ( <i>engl. Nominal Operating Cell Temperature</i> )
$n$	broj uključenih elektrona
$n_{BT}$	broja loših (nepotpunih) punjenja baterije
$n_{BT}^{rep}$	ukupan broj zamjena baterije
$n_c$	ukupan broj stupnjeva kompresije kompresora
$n_{dan}$	redni broj dana u godini

---

$n_{EL}$	broj elektrolizatorskih članaka u seriji
$n_{EL,c}$	trenutan ukupan broj ciklusa uključivanja i isključivanja elektrolizatora
$n_{EL,s}$	trenutan ukupan broj radnih sati elektrolizatora
$n_{EL,c}^{EOL}$	rubni uvjet ukupnog mogućeg broja ciklusa uključivanja i isključivanja elektrolizatora do kraja životnog vijeka
$n_{EL,s}^{EOL}$	rubni uvjet ukupnog mogućeg broja radnih sati elektrolizatora do kraja životnog vijeka
$n_{EL,c}^{godina}$	ukupan postignuti broj ciklusa uključivanja i isključivanja elektrolizatora u jednoj godini
$n_{EL,s}^{godina}$	ukupan postignuti broj radnih sati elektrolizatora u jednoj godini
$n_{FC,c}$	trenutan ukupan broj ciklusa uključivanja i isključivanja FC-a
$n_{FC,s}$	trenutan ukupan broj radnih sati FC-a
$n_{FC,c}^{EOL}$	rubni uvjet ukupnog mogućeg broja ciklusa uključivanja i isključivanja FC-a do kraja životnog vijeka
$n_{FC,s}^{EOL}$	rubni uvjet ukupnog mogućeg broja radnih sati FC-a do kraja životnog vijeka
$n_{FC,c}^{godina}$	ukupan postignuti broj ciklusa uključivanja i isključivanja FC-a u jednoj godini
$n_{FC,s}^{godina}$	ukupan postignuti broj radnih sati FC-a u jednoj godini
$n_g$	broj godina razmatranog vremenskog perioda
$\dot{n}_{H_2}$	količina proizvedenog vodika
$\bar{n}_{H_2}$	količina vodika u spremniku
$n_p$	razmatrana komponenta sustava
$n_{n_p}^{rep}$	broj zamjena razmatrane komponente
$OM$	godišnje troškove rada i održavanja ( <i>engl. Operation and Maintenance</i> )
$P_{BT,charg}$	snaga punjenja baterije
$P_{BT,disch}$	snaga pražnjenja baterije
$P_C$	snaga višestupanjskog klipnog kompresora
$P_{EL}$	snaga elektrolizatora
$P_{EL,r}$	nazivna snaga elektrolizatora
$P_{EL,rel}$	relativnu snagu elektrolizatora

---

$P_{FC}$	snaga gorivnog članka
$P_{FC,r}$	nazivna snaga gorivnog članka
$P_{FC,rel}$	relativna snaga gorivnog članka
$P_{FC,r}^{BoL}$	nazivna snaga FC uređaja na početku životnog vijeka
$P_{FC,r}^{EoL}$	nazivna snaga FC uređaja na kraju životnog vijeka
$P_L$	snaga opterećenja
$P_{L,a}$	prosječnom snagom opterećenja
$P_{PV}$	izlazna snaga PV modula
$P_{PV,r}$	nazivna snaga PV modula
$P_w$	snaga vjetra
$P_{WT}$	izlazna snaga vjetroturbine
$P_{WT,rel}$	relativna snaga vjetroturbine
$P_{WT,r}$	nazivna snaga vjetroturbine
$p_{c,ul}$	tlak kompresora na usisu
$p_{c,r}$	nazivni tlak kompresora
$p_{cs}$	tlak na kraju stupnja kompresije
$p_{H_2}$	trenutni tlak skladištenja vodika
$p_{H_2}^{emp}$	tlak praznog spremnika vodika
$p_{H_2}^{in}$	inicijalan tlak spremnika vodika
$p_{H_2,p}$	parcijalni tlak vodika
$p_{H_2O,p}$	parcijalni tlak vode
$p_{O_2,p}$	parcijalni tlak vodika
$R$	univerzalna plinska konstanta
$R_b$	omjer izravnog Sunčevog zračenja na južno orijentiranu plohu nagnute prema horizontali i izravnog zračenja na horizontalnu plohu
$R_{EL,i}$	unutarnji otpor članka elektrolizatora
$R_{FC,i}$	unutarnji otpor FC članaka
$R_{H_2}$	plinska konstanta vodika

---

$R_S$	serijski otpornik
$R_{Sh}$	otpor paralelnog spoja ( <i>engl. shunt</i> )
$RC$	kapitalni trošak zamjene komponenata ili dijelova komponenata na kraju životnog vijeka razmatrane komponente ( <i>engl. Replacement Cost</i> )
$RL_{np}$	preostalo vrijeme životnog vijeka razmatrane komponente sustava
$RRC$	relativna pouzdanost pojedine komponente sustava ( <i>engl. Relative Reliability of Component</i> )
$r_{EL,p}$	omjer parazitske snage i neto ulazne snage elektrolizatora
$r_{FC,p}$	omjer parazitske snage i bruto izlazne snage gorivnog članka
$SoC_{BT}$	stanje napunjenosti baterije
$SoC_{BT,min}$	minimalna vrijednost stanja napunjenosti baterije od zadnjeg punog punjenja
$SoC_{BT,max}$	najviša vrijednost stanja napunjenosti baterije koja se postigne prilikom jednog punjenja
$SR$	ukupna pouzdanost sustava ( <i>engl. System Reliability</i> )
$SSP$	povrat sredstava na kraju razmatranog vremenskog perioda ( <i>engl. System Salvage Price</i> )
$T_a$	temperatura okolnog zraka
$T_{BT}$	temperatura baterije
$T_c$	temperatura PV ćelije
$T_{c,st}$	radna temperatura ćelije pri standardnim radnim uvjetima
$T_{c,x}$	ograničenje dopuštene temperature vodika na kraju procesa kompresije
$T_{gas,0}$	nominalna temperatura stvaranja plinova
$T_{H_2,s}$	temperatura skladištenja vodika
$T_{kor,0}$	nominalna temperatura stvaranja korozivnog sloja
$T_p$	temperatura procesa
$t$	vremenski trenutak
$t_0$	inicijalni vremenski trenutak
$t_{lok}$	zemaljsko mjesno vrijeme za određenu lokaciju
$t_s$	Sunčevim vremenom
$U_{BT}$	napon punjenja/praznjenja baterije

---

$U_{EL}$	napon članka elektrolizatora
$U_{EL,act}$	aktivacijski prenapon
$U_{EL,BoL}$	napon članka elektrolizatora na početku životnog vijeka
$U_{EL,con}$	koncentracijski prenapon
$U_{EL,EoL}$	napon članka elektrolizatora na kraju životnog vijeka
$U_{EL,oc}$	napon otvorenog kruga
$U_{EL,ohm}$	prenapon uzrokovan ohmskim gubitcima članka elektrolizatora
$U_{EL,rev}$	reverzibilni potencijal ćelije pri standardnom tlaku i temperaturi
$U_{FC}$	napon FC članka
$U_{FC,act}$	napon aktivacijskih gubitaka
$U_{FC,BoL}$	napon FC članka na početku životnog vijeka
$U_{FC,con}$	koncentracijski gubitak
$U_{FC,EoL}$	napon FC članka na kraju životnog vijeka
$U_{FC,ohm}$	ohmski gubitak FC članka
$U_{FC,t}$	teoretski napon gorivnog članka
$U_{gas,0}$	nominalni napon stvaranja plinova
$U_{kor}$	korozijski napon pozitivne elektrode
$U_{kor,0}$	napon korozije napunjene baterije bez protoka struje
$V_{H_2,r}$	nazivni volumen spremnika vodika
$v$	brzina vjetra pri razmatranoj visini
$v_{ci}$	ulazna brzina vjetra ( <i>engl. cut-in wind speed</i> )
$v_{co}$	izlazna brzina vjetra ( <i>engl. cut-out wind speed</i> )
$v_m$	poznata brzina vjetra na poznatoj visini mjerenja
$v_r$	nazivna brzina vjetra
$v_\infty$	neometana brzina strujanja zraka u prostoru
$x$	raspon dubine pražnjenja
$y$	visina stupa vjetroturbine
$y_0$	visina hrapavosti trena



---

$y_m$	poznata visina mjerenja
$Z_{IEC}$	broj ciklusa baterije do kraja životnog vijeka prema Međunarodnoj elektrotehničkoj komisiji
$Z_W$	težinski broj ciklusa bez utjecaja korozije
$z$	koeficijent kompresibilnosti vodika
$z_{CS}$	koeficijent kompresibilnosti vodika na kraju stupnja kompresije

### Grčki alfabet

$\alpha$	koeficijent prijelaza naboja
$\alpha_s$	visinom Sunca
$\beta$	kut nagnute plohe
$\gamma$	azimut nagnute plohe
$\gamma_{BT}$	stupanj samopražnjenja baterije
$\Delta E_{dif}$	energetska razlika proizvedene energije i energetske potreba opterećenja
$\Delta T_{BT}$	razlika temperatura između temperature baterije i referentne temperature od 25 °C
$\Delta t$	prirast vremena
$\Delta t_v$	korekcijski faktor vremena
$\Delta U_{EL,deg}$	prirast napona uslijed degradacije PEM elektrolizatora
$\Delta U_{FC,deg}$	stopa degradacije PEM FC-a
$\Delta W$	efektivna debljina korozivnog sloja
$\Delta W_{lim}$	rubni uvjet debljine korozivnog sloja
$\delta$	deklinacija Sunca
$\eta_{AC}$	učinkovitost AC/DC naponskog pretvarača
$\eta_{BT}$	učinkovitost punjenja/pražnjenja baterije
$\eta_c$	učinkovitost višestupanjskog kompresora
$\eta_{DC}$	učinkovitost DC/DC naponskog pretvarača
$\eta_{EL}$	učinkovitost elektrolizatorovog uređaja ( <i>engl. electrolyzer system efficiency</i> )
$\eta_F$	Faraday-eva učinkovitost

$\eta_{FC}$	učinkovitost FC uređaja ( <i>engl. FC system efficiency</i> )
$\eta_{PV}$	učinkovitost PV modula
$\eta_{PV,BOL}$	učinkovitost PV modula na početku životnog vijeka
$\eta_s$	energetska učinkovitost sustava
$\theta$	kut između upadne zrake sunca na nagnutu plohu i normale na nagnutu plohu
$\kappa$	omjer specifičnih toplina vodika
$\lambda$	jednoliko raspodijeljeni nasumični broj
$\lambda_{lok}$	zemljopisna duljina razmatrane lokacije
$\lambda_{st}$	zemljopisna duljina referentnog meridijana
$\lambda_{WT}$	omjer vršnih brzina ( <i>engl. Tip Speed Ratio</i> )
$\mu_{P,st}$	temperaturni koeficijent snage
$\rho$	albedo (koeficijent refleksivnosti)
$\rho_a$	gustoća zraka
$\rho_c$	efektivni unutarnji otpor punjenja
$\rho_d$	efektivni unutarnji otpor pražnjenja
$\tau_{BT}$	faktor utjecaja temperature
$\phi$	kutu zakreta lopatice vjetroturbine
$\varphi$	zemljopisnom širinom
$\omega$	satni kut Sunca



## 1. UVOD

Energetski sektor u svijetu se pretežito temelji na fosilnim gorivima, te kao takav ima negativan utjecaj na okoliš pridonoseći sve većoj koncentraciji stakleničkih plinova. Potreba za prelazak na ekološki prihvatljive i održive obnovljive izvore energije (OIE) sve je jasnija. Do sada je većina zemalja u svijetu postavila nekakav oblik nacionalnih ciljeva po pitanju proizvodnje i korištenja energije iz OIE. Međutim, samo je nekoliko vlada diljem svijeta provelo politiku male proizvodnje OIE, koja se uglavnom odnosi za nove zgrade i velike projekte obnove, dok nijedna od tih politika ne razmatra male energetske sustave i male proizvođače [1]. Jedan od načina za postepeno uvođenje OIE mogao bi biti kroz korištenje samostalnih hibridnih energetske sustava.

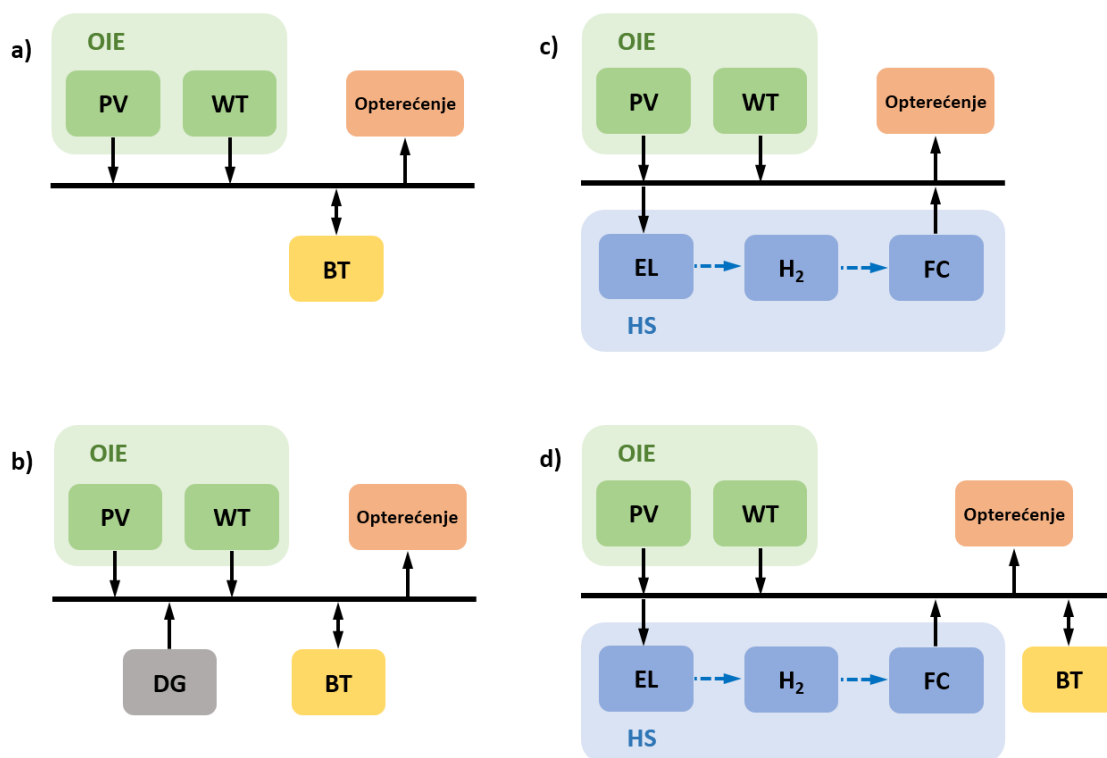
Energetski sustavi se mogu dijeliti prema konfiguracijama sastavnih elemenata sustava, te prema tome je li sustav spojen na energetske mreže. Energetski sustavi koji se koriste jednim oblikom obnovljivih izvora energije, najčešće solarnom energijom, bez sustava za skladištenje energije su najčešće korištena konfiguracija od strane malih proizvođača energije i to u svrhu prodaje proizvedene električne energije za ostvarivanje dobiti. Postepena komercijalizacija OIE, s naglaskom na solarnu energiju, dovela je do pada tržišnih cijena fotonaponskih modula (*engl. Photovoltaic module, PV*) od 75% u posljednjih deset godina [2]. Pristupačne cijene i jednostavna ugradnja rezultirala je porastom broja ugrađenih PV sustava spojenih na mrežu, isključivo u svrhu proizvodnje električne energije. S druge strane, cijene malih i srednjih vjetroturbina (*engl. Wind Turbine, WT*) su još uvijek visoke [2, 3], te uz visoke cijene transporta i ugradnje [3, 4] nisu se pokazale isplative za isključivo prodaju proizvedene električne energije.

Hibridni energetske sustav u sprezi s obnovljivim izvorima energije, koji osim proizvodnog kapaciteta imaju ugrađen i skladišta energije, te su spojeni na energetske mreže su također predmet istraživanja [5–7]. Takvim sustavima su glavni ciljevi opskrba energijom krajnjeg korisnika, te smanjenje cijene korištene električne energije. Energetske mreže se u takvim slučajevima koristi kao skladište ili izvor električne energije u nuždi.

Samostalni hibridni energetske sustavi u sprezi s obnovljivim izvorima energije (*engl. Hybrid Renewable Energy System, HRES*) se najčešće koriste u ruralnim sredinama, gdje nema pristupa energetske mreže, ili u slučajevima kad je dovođenje energetske mreže ekonomski ne isplativo,

kao na primjer u svrhu napajanja telekomunikacijske stanice. Pošto je HRES odvojen od energetske mreže, kao takav je u potpunosti odgovoran za uspješno zadovoljavanje potreba krajnjeg opterećenja. Osnovni problemi HRES-a su vezani za samu pouzdanost sustava, s aspekta dostupnosti energije kada je potrebna. Energija vjetra može biti dostupna u svako doba dana i noći, ali je također nepredvidljiva, te može imati velike oscilacije u kratkom vremenskom periodu [8]. S druge strane, solarna energija je lakša za predvidjeti, ali nedostatak solarne energije tokom noći, te u ranim jutarnjim i kasnim popodnevnim satima, može uzrokovati nedostatak energije u sustavu. Zbog tako visoke isprekidanosti proizvodnje energije iz PV i WT, skladište energije je neophodno unutar HRES-a kako bi se postigla bolja pouzdanost opskrbe energije krajnjeg opterećenja. Olovno-kiselinske baterije (BT) su tradicionalno najčešće korištena skladišta energije unutar HRES-a, te su još uvijek najučinkovitiji način kratkoročnog skladištenja energije, slika 1.1a. Neki od glavnih razloga za korištenje baterije su visoka sveukupna učinkovitost, jednostavna ugradnja, te niska razina održavanja [9]. Međutim, niska gustoća skladištenja energije kod baterije može predstavljati problem, na način da se tražena pouzdanost sustava može postići samo s visokim vrijednostima kapaciteta baterije. Diesel generatori (DG) su često korišteni uz bateriju kao dodatan izvor energije unutar HRES-a [10–12], slika 1.1b. Osnovni problemi korištenja DG su emisije ugljikovog dioksida, održavanje, te potreba za nadopunjavanjem goriva, ali relativno niske cijene goriva ih čine ekonomski opravdanim za korištenje unutar HRES-a.

Osim olovno-kiselinskih baterija, za skladištenje energije unutar HRES-a se također koristi i vodikov podsustav (*engl. Hydrogen Subsystem*, HS) sastavljen od elektrolizatora (EL) za proizvodnju vodika, spremnika vodika, te gorivnih članaka (*engl. Fuel Cell*, FC) za dobivanje električne energije iz vodika. Posljednjih godina se najčešće, kao sastavni dijelovi HS-a, razmatraju i koriste elektrolizatora i FC s polimernim membranama (*engl. Polymer Electrolyte Membrane* ili *Proton Exchange Membrane*, PEM) [13–17]. PEM elektrolizator i FC imaju dobar odaziv na brze promjene opterećenja, što ih čini izuzetno pogodnima za rad u kombinaciji s isprekidanim i promjenjivim obnovljivim izvorima energije [18, 19]. Za razliku od baterije, HS postiže visoku gustoću skladištenja energije, a povećanjem tlaka skladištenja moguće je izvršiti skladištenje jako visoke količine vodika, te je kao takav odličan za dugoročno ili sezonsko skladištenje energije. Glavni nedostatak HS je, u odnosu na bateriju, niska sveukupna učinkovitost. Autori [13–17] su istraživali korištenje HS kao jedini oblik skladištenja energije unutar HRES-a, slika 1.1c.



Slika 1.1: Različite konfiguracije samostalnih hibridnih energetskih sustava

Korištenjem PV/WT kombinacije za proizvodnju energije, te BT/HS kombinacijom za skladišta energije, uspijeva se smanjiti djelovanje intenziteta promjenjivosti i isprekidanosti proizvedene energije na rad HRES-a [20]. Nadalje, korištenjem BT/HS kombinacije skladištenja energije se postiže bolja energetska učinkovitost sustava i niži inicijalni kapitalni troškovi, u usporedbi sa HRES koji koriste samo bateriju ili HS kao skladište energije [21].

## 1.1. Hipoteza

Hipoteze znanstvenog istraživanja u doktorskoj disertaciji su sljedeće:

Hipoteza 1: Strategijom upravljanja energije unutar samostalnog hibridnog energetskog sustava moguće je utjecati na dinamiku gubitka kapaciteta komponenti razmatranog samostalnog hibridnog energetskog sustava.

Hipoteza 2: Gubitak kapaciteta komponenti samostalnog hibridnog energetskog sustava će utjecati na dimenzioniranje inicijalnih kapaciteta komponenti razmatranog samostalnog hibridnog energetskog sustava.

Hipoteza 3: Profil opterećenja krajnjeg korisnika utječe na životni vijek komponenti samostalnog hibridnog energetskog sustava.

## 1.2. Metodologija istraživanja

Razmatrani HRES se sastoji od PV modula i vjetroturbine za proizvodnju energije, olovno-kiselinske baterije za kratkoročno skladištenje energije i vodikovog podsustava za dugoročno skladištenje energije. Vodikov podsustav se sastoji od PEM elektrolizatora za proizvodnju vodika, kompresora i spremnika vodika za visokotlačno skladištenje vodika i PEM FC-a za korištenje skladištenog vodika.

Razmatrana su tri različita profila opterećenja krajnjeg korisnika:

- konstantni profil opterećenja (konstantna vrijednost opterećenja kroz cijeli razmatrani vremenski period kojim je simuliran tip krajnjeg korisnika kao što je telekomunikacijska bazna stanica)
- stohastički profil opterećenja (profil opterećenja kojim je simuliran nepredvidljivi tip opterećenja kućanstava)
- impulsni profil opterećenja (profil opterećenja kojem intervali između minimalne i maksimalne snage opterećenja ovisiti o izlascima i zalascima sunca; ovim profilom opterećenja je simuliran tip krajnjeg korisnika kao što je noćna rasvjeta)

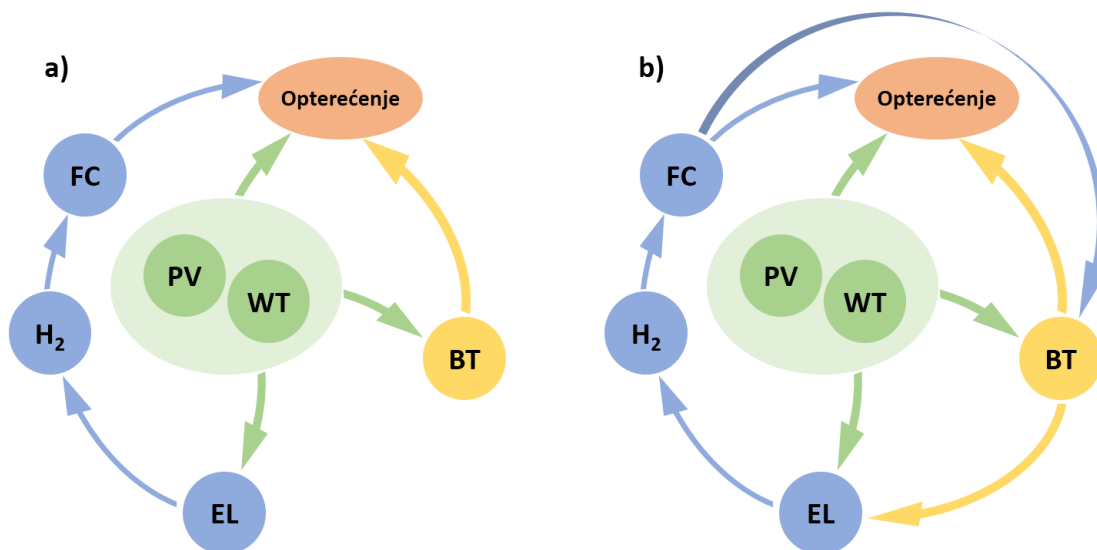
Za svaku komponentu sustava je definiran matematički model kojim su opisane pripadajuće radne karakteristike komponente. Ulazni satni podaci globalnog Sunčevog zračenja, brzine vjetra i temperature zraka se odnose za lokaciju Split, Hrvatska. Za PV modul, olovno-kiselinsku bateriju, PEM elektrolizator i PEM FC su definirani matematički modeli gubitka kapacitet.

Dinamika gubitka kapaciteta i kraj životnog vijeka olovno-kiselinske baterije je definirana modelom težinske prolazne energije kroz bateriju. Modelom težinske prolazne energije kroz bateriju su razmatrana dva mehanizma gubitka kapaciteta olovno-kiselinskih baterija: gubitak kapaciteta uslijed korozije; gubitak kapaciteta uslijed degradacije aktivne mase.

Za određivanje dinamike gubitka kapaciteta PEM elektrolizatora i PEM FC-a kreirani modeli degradacije prema rubnim uvjetima o kraju životnog vijeka dostupnima iz literature. Svakim radnim satom i svakim ciklusom uključivanja gubitak kapaciteta se registrira prirastom napona za elektrolizator, te padom napona za FC.

Rad HRES-a je razmatran za dvije različite strategije upravljanja energijom. Prva strategija upravljanja energijom se zasniva na balansiranju energije unutar razmatranog sustava kroz određivanje prioriteta energetske tokova na temelju učinkovitosti. Druga strategija upravljanja

energijom se zasniva na logici upravljanja dvostrukih histereza, gdje se stanje napunjenosti baterije koristiti kao varijabla za upravljanje uključivanja i isključivanja elektrolizatora i FC-a. Za obje razmatrane strategije upravljanja energijom, izravno zadovoljavanje potreba opterećenja iz obnovljivih izvora energije je energetska tok najvišeg stupnja prioriteta. Slika 1.2 prikazuje moguće tokove energije dviju razmatranih strategija upravljanja energijom. Implementacija matematičkih modela komponenata i logike strategija upravljanja energijom je izvršena u programskom paketu MATLAB.



Slika 1.2: Mogući tokovi energije unutar samostalnog energetskog sustava: a) strategija upravljanja energijom bazirana na balansiranju energije unutar sustava; b) strategija upravljanja energijom bazirana na logici dvostrukih histereza

Dimenzioniranje HRES-a je izvršeno višeciljnom optimizacijom korištenjem MATLAB-ovog GA Optimization Toolbox-a. Razmatrane funkcije cilja su:

- energetska učinkovitost sustava (tehnička funkcija cilja; učinkovitost sustava je definirana kako omjer iskorištene energije od strane krajnjeg korisnika i ukupne ulazne energije u sustav)
- pouzdanost sustava (tehnička funkcija cilja; pouzdanost sustava je definirana prema životnom vijeku komponenti sustava)
- cijena korisne energije (ekonomska funkcija cilja; cijena korisne energije je definirana prema inicijalnim kapitalnim troškovima, troškovima održavanja i potencijalnom povratu investicija iz reciklaže)



### 1.3. Znanstveni doprinos

Izvorni znanstveni doprinosi ove doktorske disertacije su sljedeći:

- Doprinos razumijevanju utjecaja gubitka kapaciteta komponenata na radne parametre samostalnog hibridnog energetskeg sustava.
- Razrada metode za primjenu modela degradacije komponenata pri simulaciji rada samostalnog hibridnog energetskeg sustava.
- Doprinos razumijevanju utjecaja profila opterećenja krajnjeg korisnika na životni vijek komponenata samostalnog hibridnog energetskeg sustava.
- Razrada metode dimenzioniranja samostalnog hibridnog energetskeg sustava uzimajući u obzir gubitke kapaciteta komponenata sustava.
- Doprinos razumijevanju utjecaja strategije upravljanja energijom na dinamiku gubitka kapaciteta komponenata samostalnog hibridnog energetskeg sustava.

### 1.4. Struktura rada

U uvodnom poglavlju doktorske disertacije su predstavljene hipoteze znanstvenog istraživanja, provedena metodologija znanstvenog istraživanja i izvorni znanstveni doprinosi.

U drugom poglavlju doktorske disertacije je izvršen pregled literature dosadašnjih istraživanja na području analize rada HRES-a. Pregledom literature je razmatrana problematika modeliranja i simuliranja rada HRES-a, različite metode dimenzioniranja HRES-a i različite strategije upravljanja energijom unutar HRES-a. Na kraju poglavlja su doneseni kratki zaključci izvučeni iz izvršenog pregleda literature.

U trećem poglavlju doktorske disertacije je predstavljena razmatrana HRES konfiguracija i detaljan opis matematičkih modela radnih karakteristika sastavnih komponenata sustava, matematički modeli procesa gubitka kapaciteta pojedinih komponenata, te ulazni podaci o vremenskim uvjetima i razmatrani profili opterećenja krajnjeg korisnika.

U četvrtom poglavlju doktorske disertacije su predstavljene razmatrane strategije upravljanja energijom unutar HRES-a. Razmatrane su dvije strategije upravljanja energijom: logika upravljanja na bazi energetske bilance u sustavu; logika upravljanja na bazi petlji dvostrukih histereza. Svaka strategije je detaljno objašnjena uz pripadajući dijagram toka logike upravljanja.

U petom poglavlju doktorske disertacije je predstavljene metoda dimenzioniranja HRES-a. Kao metodu dimenzioniranja je izabrana višeciljna optimizacija genetskim algoritmom prema tri funkcije cilja.

U šestom poglavlju doktorske disertacije su prezentirani postignuti rezultati dimenzioniranja i simulacije rada HRES-a za šest različitih razmatranih slučajeva. Izvršena je analiza postignutih rezultata uz diskusiju.

Na kraju doktorske disertacije su dani zaključci cjelokupnog istraživanja, te smjernice za budući znanstveno istraživački rad.

## 2. PREGLED LITERATURE

U ovom poglavlju je izvršen pregled istraživanja na temu samostalnih hibridnih energetskekih sustava, sa fokusom na simuliranje rada sustava, različite metode dimenzioniranja sustava i različite strategije upravljanja energijom unutar sustava. Pregledom istraživanja po pitanju simuliranja rada sustava su razmatrani različiti pristupi matematičkog modeliranja radnih karakteristika i različiti pristupi određivanja životnog vijeka sastavnih komponenti. Nadalje, razmatrani su različiti profili opterećenja, vremenski periodi i rezolucije simulacija, te korišteni programski paketi i alati.

### 2.1. Simuliranje rada samostalnih hibridnih energetskekih sustava

Svaka kvalitetna analiza HRES-a kreće od dobro postavljenih matematičkih modela, kojima se nastoje što bolje opisati radne karakteristike svih komponenata razmatrane konfiguracije sustava. U literaturi su za različite konfiguracije korištene i predlagane različite kombinacije matematičkih modela razmatranih komponenata sustava, tablica 2.1.

Mnogi autori koriste programski paket MATLAB za implementaciju matematičkih modela istraživanih HRES konfiguracija, kako bi proveli simulacije rada istih [13, 17, 22–29]. U literaturi se također koriste komercijalni programski alati za simuliranje rada HRES-a, koji u svojim bibliotekama sadrže modele spremne na korištenje. Jedan od takvih programskih alata je TRNSYS. TRNSYS (*engl. Transient System Simulation Tool*) je fleksibilno grafičko sučelje modularne strukture, primarno korišteno u području obnovljivih izvora energije u svrhu simuliranja energetskekih sustava [30, 31]. Iako je TRNSYS uglavnom usmjeren na procjene izvedbi energetskekih sustava, sučelje se također može koristiti i za modeliranje drugih dinamičkih procesa. Standardna biblioteka sadržava približno 150 matematičkih modela različitih komponenata [30, 31], koji su otvorenog tipa, pa su tako korisniku omogućene izmjene ili nadogradnja postojećih modela ili dodavanje potpuno novih modela. TRNSYS-ova baza podataka također uključuje ulazne podatke o Sunčevu zračenju i brzinama vjetra za lokacije širom svijeta. TRNSYS je korišten u svrhu simulacije HRES-a u [8, 32–35].

Za simuliranje rada HRES-a se također koriste i druga komercijalna sučelja, kako što su HOMER [2, 36, 37] i HOGA, o kojima će biti više rečeno u nastavku.

Tablica 2.1: Pregled korištenih matematičkih modela HRES komponenata

Komponenta	Model	Literatura
PV modul	$I_{PV} = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{U_{PV} + I_{PV}R_S}{a}\right) - 1 \right] - \frac{U_{PV} + I_{PV}R_S}{R_{Sh}}$	(2.1) [21, 23, 28, 29, 38–44]
	$U_{PV} = a \cdot \ln \left[ \frac{(I_L - I_{PV})R_{Sh} - U_{PV} - I_{PV}R_S}{I_0 R_{Sh}} + 1 \right] - I_{PV}R_S$	
	$P_{PV} = P_{PV,r} \cdot f_{PV} \cdot \frac{E_\beta}{E_{st}} \cdot [1 + \mu_{P,sc}(T_c - T_{c,st})]$	(2.2) [14, 45–47]
	$P_{PV} = P_{PV,r} \cdot f_{PV} \cdot \frac{E_\beta}{E_{st}}$	(2.3) [8, 13]
	$P_{PV} = E_\beta \cdot A_{PV} \cdot \eta_{PV}$	(2.4) [15, 25, 48]
Vjetroturbina	$P_{WT} = \begin{cases} 0 & ; v < v_{ci} \\ \frac{1}{2} \rho_a A_{WT} v^3 C_p(\lambda_{WT}, \phi) & ; v_{ci} \leq v < v_r \\ P_{WT,r} & ; v_r \leq v < v_{co} \\ 0 & ; v \geq v_{co} \end{cases}$	(2.5) [15, 16, 28, 38, 39, 41, 43–46, 48–50]
Gorivni članak	$P_{FC} = \dot{m}_{H_2} \cdot HHV \cdot \eta_{FC} \quad ; \quad \eta_{FC} = \text{konstanta}$	(2.6) [13, 38]
	$U_{FC} = U_{FC,t} - b \log\left(\frac{i}{i_0}\right) - \frac{RT_p}{nF} \ln\left(\frac{i_L}{i_L - i}\right) - iR_{FC,i}$	(2.7) [14, 16, 21, 23, 28, 40, 41, 47, 51]
Elektrolizator	$P_{EL} = \frac{\dot{m}_{H_2} \cdot HHV}{\eta_{EL}} \quad ; \quad \eta_{EL} = \text{konstanta}$	(2.8) [13], [14], [38]
	$\dot{n}_{H_2} = \frac{\eta_F n_{EL} I_{EL}}{2F}$	(2.9) [21, 23, 28, 41, 42, 51]
	$U_{EL} = U_{EL,oc} + \frac{RT_p}{nF} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) + iR_{EL,i}$	(2.10) [16], [47]
H <sub>2</sub> spremnik	$m_{H_2}(t) = m_{H_2}(t_0) \pm m_{H_2}(\Delta t)$	(2.11) [8, 13, 15, 25, 38, 48, 49, 52, 53]
	$p_{H_2} = \frac{m_{H_2} \bar{R}_{H_2} T_{H_2,s}}{V_{H_2,r}}$	(2.12) [21, 23]
	$p_{H_2} = \frac{m_{H_2} \bar{R}_{H_2} T_{H_2,s}}{V_{H_2,r}} \cdot z(p_{H_2}, T_{H_2,s})$	(2.13) [54]
	$p_{H_2} = \frac{m_{H_2} RT}{V_n - m_{H_2} b_{VdW}} - a_{VdW} \frac{m_{H_2}}{V_n^2}$	(2.14) [41, 51]
	$p_{H_2} = \frac{\bar{n}_{H_2}^2 \bar{R} T}{V_n^2} \left( 1 - \frac{\bar{n}_{H_2} c_{BB}}{V_n T^3} \right) \left[ \frac{V_n}{\bar{n}_{H_2}} + B_{BB} \right] - \frac{A_{BB}}{V_n^2}$	
	$A_{BB} = A_{0,BB} \left( 1 - \frac{\bar{n}_{H_2} a_{BB}}{V_n} \right)$	(2.15) [42]
	$B_{BB} = B_{0,BB} \left( 1 - \frac{\bar{n}_{H_2} b_{BB}}{V_n} \right)$	
Baterija	$SoC_{BT}(t) = \left[ 1 - \frac{\int_{t_0}^t I_{BT}(t) dt}{C_{BT,r}} \right] \cdot 100\%$	(2.16) [23, 25, 28, 42, 43, 46]
	$SoC_{BT}(t) = (1 - \gamma_{BT}) \cdot SoC_{BT,0} - \left( \frac{\int_{t_0}^t I_{BT}(t) dt}{C_{BT,r}} \right) \cdot 100\%$	(2.17) [40, 41, 51]

U literaturi su razmatrani različiti vremenski periodi za simuliranje rada HRES, a najčešće je razmatran vremenski period od jedne godine i jednosatnu rezoluciju [15, 21, 23, 33, 45–47, 55]. U [8] simulacije su izvršene za vremenski period od jedne godine i korak od 15 sekunda. Dash i Bajpai [24] simuliraju rad sustava na vremenski period od 24 i 48 sati u ljetnoj sezoni. Dvadeset i četiri satne simulacije su izvršene u [17, 27], s korakom od jednog sata u [17] i jedne minute u [27]. Autori u [51, 56] su izvršili simulacije za vremenski period od četiri tjedna, rezolucija jedan sat, gdje svaki simulirani tjedan predstavlja jedno godišnje doba. U [41, 57] su izvršene simulacije na vremenski period od četiri mjeseca, a u [25, 26, 28, 29] je razmatrano 25 godina, uz korak od jednog sata.

Osim različitih vremenskih perioda, u literaturi su također razmatrani i različiti profili opterećenja krajnjeg korisnika, od kojih je najčešće korišten, takozvani, normalizirani srednje dnevni profil opterećenja bez sezonskih oscilacija [8, 23, 25, 58] i sa sezonskim oscilacijama opterećenja na godišnjoj razini [26, 59]. Normalizirani srednji dnevni profili opterećenja su najčešće kreirani prema dostupnim godišnjim ili višegodišnjim podacima o energetskim potrebama na razini nekog grada, regije ili države. Osim srednjih dnevnih profila opterećenja, u literaturi se također razmatraju i stohastički profili opterećenja [15, 60], konstantni profili opterećenja [36, 50] i profili opterećenja kućanstava [16, 61, 62], dok neka istraživanja razmatraju profile opterećenja vezana za specifičnu lokaciju [10, 53, 63, 64].

Mnogi autori postavljaju rubne uvjete dubine pražnjenja baterije ili granicu do koje se može izvršiti punjenje u svrhu zaštite baterije od ubrzane degradacije [23, 24, 27, 32, 33, 41, 57]. Za FC i elektrolizator se postavljaju uvjeti raspona radnih točaka, za koje se smatra da se postiže siguran rad elektrolizatora i FC [32, 41, 57]. Međutim, osim što postavljaju rubne uvjete rada komponenata sustava, u literaturi se rijetko pronalaze istraživanja gdje se koriste modeli degradacije elemenata sustava, te se ne provode analize utjecaja degradacije elemenata na rad HRES-a.

### 2.1.1. Određivanje životnog vijeka baterije

U literaturi se koriste različiti pristupi za određivanje životnog vijeka baterije:

- Predodređen broj godina životnog vijeka
- Ekvivalentan broj punih ciklusa do kraja životnog vijeka
- Kumulativno brojanje ciklusa punjenje i pražnjenja (*engl. Rainflow cycle counting method*)

- Ukupan protok energije kroz bateriju (*engl. Energy throughput model, Ah model*)
- Težinski protok energije kroz bateriju (*engl. Weighted Ah model*)

Izbor predodređenog broja godina životnog vijeka baterije se najčešće vrši prema podacima dostupnim od strane proizvođača baterije ili procjenom autora [48, 55]. Cilj korištenja ovakvog pristupa određivanja životnog vijeka baterije je isključivo simulacija troškova prilikom zamjene baterije, jer predviđeni životni vijek baterije nema drugog utjecaja na simulaciju rada sustava. Životni vijek baterije je obično procijenjen na 5 godina [48, 55], 10 godina [61, 64] ili 15 godina [63].

Metoda brojanja ekvivalentnog broja punih ciklusa određuje kraj životnog vijeka (*engl. End of Life, EoL*) baterije kad se postigne ukupan broj punih ciklusa punjenja-pražnjenja baterije definiran od strane proizvođača prema IEC (*engl. International Electrotechnical Commission*) standardu. Ekvivalentni puni broj ciklusa ( $Z_N$ ) se određuju prema energiji pražnjenja baterije i nominalnom kapacitetu baterije, što je jednako:

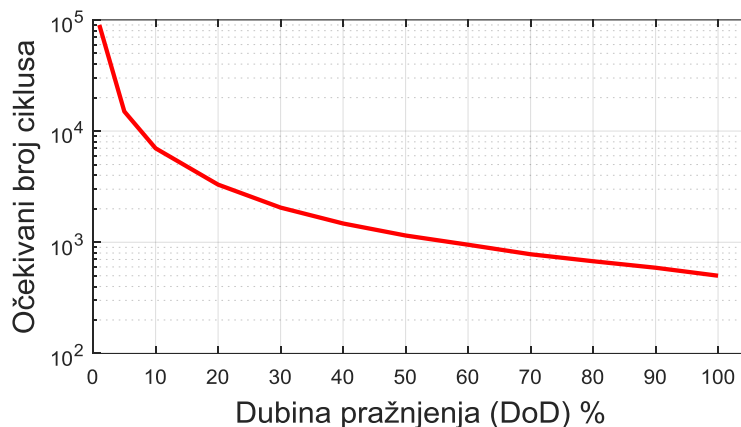
$$Z_N = \int_0^t \frac{|P_{BT,disch}|}{C_{BT,r}} dt \quad (2.18)$$

gdje je  $P_{BT,disch}$  snaga pražnjenja baterije u razmatranom vremenskom periodu  $t$ ,  $C_{BT,r}$  je nazivni kapacitet baterije. Ovom metodom određivanja životnog vijeka baterije se koriste mnogi alati za optimizaciju i simulaciju rada samostalnih hibridnih energetske sustava [65]. Metodom brojanja ekvivalentnog broja punih ciklusa se ne određuje dinamika gubitka kapaciteta baterije, već se isključivo radi procjena trenutka potrebne zamjene baterije. U usporedbi s predodređenim brojem godina životnog vijeka baterije, ovom metodom se postiže procjena koja izravno ovisi o dinamici rada sustava u kojem je razmatrana baterija sastavna komponenta.

Kumulativno brojanje ciklusa punjenja i pražnjenja se bazira na brojanju ciklusa ( $Z_x$ ) za svaki raspon dubine pražnjenja baterije. Za svaki raspon dubine pražnjenja baterije se uzima potreban ukupan broj ciklusa do kraja životnog vijeka baterije prema krivulji broja ciklusa punjenja i pražnjenja u ovisnosti o dubini pražnjenja, slika 2.1. Ukupan broj godina životnog vijeka baterije se mogu odrediti prema sljedećem izrazu:

$$L_{BT} = \frac{1}{\sum_{x=1}^m \frac{Z_x}{CF_x}} \quad (2.19)$$

gdje je  $m$  ukupni broj raspona dubine pražnjenja (rezolucija),  $CF_x$  je broj ciklusa do kraja životnog vijeka baterije (*engl. Cycle to Failure*) za  $x$  raspon dubine pražnjenja. Ova metoda brojanja ciklusa za određivanje kraja životnog vijeka baterije je složenija, ali i preciznija od metode brojanja ekvivalentnog broja punih ciklusa [65].



Slika 2.1: Primjer krivulje očekivanog broja ciklusa punjenja i pražnjenja do kraja životnog vijeka baterije u ovisnosti o dubini pražnjenja baterije

Metodom ukupnog protoka energije kroz bateriju se određuje ukupan broj godina životnog vijeka baterije prema krivulji broja ciklusa punjenja i pražnjenja u ovisnosti o dubini pražnjenja, nazivnom kapacitetu baterije i ukupnom protoku energije kroz bateriju za vremenski period od jedne godine [47]. Ukupan broj godina životnog vijeka baterije je definiran kao:

$$L_{BT} = \frac{\sum_{x=1}^m \frac{2 \cdot C_{BT,r} \cdot DoD_x \cdot CF_x}{m}}{\sum_{t=1}^{8760} \left( P_{BT,charg}(t) \cdot \eta_{BT} + \frac{|P_{BT,disch}(t)|}{\eta_{BT}} \right)} \quad (2.20)$$

gdje je  $P_{BT,charg}$  snaga punjenja baterije u razmatranom vremenu  $t$ ,  $\eta_{BT}$  je učinkovitost punjenja i pražnjenja baterije.

Metoda težinskog protoka energije kroz bateriju osim određivanja kraja životnog vijeka baterije, prati i dinamiku gubitka kapaciteta baterije u ovisnosti o režimu rada. Ovom metodom se razmatraju dva zasebna mehanizma gubitka kapaciteta olovno-kiselinske baterije: mehanizam degradacije aktivne mase; gubitak kapaciteta uslijed procesa korozije [65, 66]. kraj životnog vijeka baterije se proglašava trenutak kad nazivni kapacitet baterije padne na vrijednost od 80% nazivnog kapaciteta baterije na početku životnog vijeka (*engl. Beginning of Life, BoL*). Detaljan prikaz modela težinskog protoka energije je prikazan u nastavku ovog rada.

### 2.1.2. Određivanje životnog vijeka elektrolizatora i gorivnih članaka

U literaturi se koriste različiti pristupi za određivanje životnog vijeka FC i elektrolizatora:

- Predodređen broj godina životnog vijeka
- Brojanjem radnih sati do kraja životnog vijeka
- Brojanjem radnih sati i ciklusa uključivanja i isključivanja do kraja životnog vijeka

Slično kao i za slučaj baterije, izbor predodređenog broja godina do kraja životnog vijeka FC-a i elektrolizatora se najčešće vrši prema podacima dostupnima od strane proizvođača, procjena autora prema dostupnoj literaturi ili se odredi prema procijenjenom broju radnih sati do kraja životnog vijeka i očekivanom broju radnih sati kroz vremenski period od jedne godine. Glavni cilj korištenja ovakvog pristupa određivanja životnog vijeka FC-a i elektrolizatora je u svrhu simuliranja operativnih troškova zamjene cijelog uređaja ili promjene svežnje. U literaturi je životni vijek elektrolizatora procjenjivan na 5 godina [15, 53], 10 godina [16] i 20 godina [13, 67], a životni vijek FC na 5 [13, 15, 53], 10 godina [16, 34] i 15 godina [67].

Metodom brojanja radnih sati FC-a i elektrolizatora se određuje kraj životnog vijeka jednom kad ukupan broj radnih sati postigne nazivni broj očekivanih radnih sati [23, 55, 68]. Nazivni broj očekivanih radnih sati do kraja životnog vijeka FC-a i elektrolizatora se najčešće bira prema podacima dostupnima od strane proizvođača ili prema podacima dostupnim u literaturi. Metoda jednostavnog brojanja radnih sati je u nekim istraživanjima proširena razmatranjem utjecaja ciklusa uključivanja i isključivanja na životni vijek FC-a i elektrolizatora [25, 47, 69]. Životni vijek FC-a ( $L_{FC}$ ) i elektrolizatora ( $L_{EL}$ ) brojanjem radnih sati i ciklusa uključivanja i isključivanja je definiran kako:

$$L_{FC} = \left[ \frac{n_{FC,S}^{godina}}{n_{FC,S}^{EOL}} + \frac{n_{FC,C}^{godina}}{n_{FC,C}^{EOL}} \right]^{-1} \quad (2.21)$$

$$L_{EL} = \left[ \frac{n_{EL,S}^{godina}}{n_{EL,S}^{EOL}} + \frac{n_{EL,C}^{godina}}{n_{EL,C}^{EOL}} \right]^{-1} \quad (2.22)$$

gdje je  $n_{FC,S}^{godina}$  ukupan postignuti broj radnih sati FC-a u jednoj godini,  $n_{FC,C}^{godina}$  je ukupan postignuti broj ciklusa uključivanja i isključivanja FC-a u jednoj godini,  $n_{FC,S}^{EOL}$  je rubni uvjet ukupnog mogućeg broja radnih sati FC-a do kraja životnog vijeka, a  $n_{FC,C}^{EOL}$  je rubni uvjet ukupnog mogućeg broja ciklusa uključivanja i isključivanja FC-a do kraja životnog vijeka,  $n_{EL,S}^{godina}$  ukupan postignuti broj radnih sati elektrolizatora u jednoj godini,  $n_{EL,C}^{godina}$  je ukupan



postignuti broj ciklusa uključivanja i isključivanja elektrolizatora u jednoj godini,  $n_{EL,s}^{EOL}$  je rubni uvjet ukupnog mogućeg broja radnih sati elektrolizatora do kraja životnog vijeka, a  $n_{EL,c}^{EOL}$  je rubni uvjet ukupnog mogućeg broja ciklusa uključivanja i isključivanja elektrolizatora do kraja životnog vijeka. Iako se metodama jednostavnog brojanja radnih sati i ciklusa uključivanja i isključivanja ne razmatra razina degradacije FC i elektrolizatora, ovim metodama se, za razliku od predodređenog broja godina životnog vijeka, razmatra utjecaj režima rada sustava na trajanje životnog vijeka FC i elektrolizatora.

### 2.1.3. Pregled istraživanja

Tito i sur. [45] su izvršili analizu rada PV/WT/BT konfiguracije sustav, gdje uspoređuju šest različitih profila opterećenja krajnjeg korisnika. Svaki od razmatranih šest profila opterećenja predstavlja socio-demografski profil korisnika. Simulacije rada sustava su izvršene za vremenski period od jedne godine.

Radne performanse PV/WT/BT/HS konfiguracije sustava za profil opterećenja srednje velike poslovne zgrade su analizirane u [68]. Autori provode tehno-ekonomsku analizu za vremenski period od 25 godina, dok su radne performanse rada sustava simulirane na vremenski period od jedne godine. Životni vijek baterije je određen prema broju ciklusa punjenja i pražnjenja, a životni vijek elektrolizatora i FC prema broju radnih sati. Analiza je izvršena korištenjem programskog paketa MATLAB.

Marocco i sur. [47] vrše tehno-ekonomsku analizu rada PV/BT/HS konfiguracije sustava. Autori nastavljaju svoje istraživanje u [69], gdje razmatraju PV/WT/BT/HS/DG konfiguraciju sustava. U oba razmatrana slučaja autori procjenjuju životni vijek baterije prema modelu ukupne energije kroz bateriju, a životni vijek FC-a i elektrolizatora je određen brojanjem radnih sati i ciklusa uključivanja i isključivanja. Simulacije rada sustava su izvršene korištenjem programskog paketa MATLAB za vremenski period od jedne godine, dok su tehno-ekonomske analize izvršene za vremenski period od 20 godina.

Human i sur. [70] analiziraju PV/WT/BT/EL konfiguraciju sustava za proizvodnju vodika na vremenski period od 25 godina. Simulacije su izvršene korištenjem programskog paketa MATLAB. Životni vijek baterije je određen kumulativnom metodom brojanja ciklusa punjenja i pražnjenja, dok je životni vijek elektrolizatora određen brojanjem radnih sati. Autori ne navode profil opterećenja potrošnje vodika.

Garcia i sur. [25] analiziraju PV/WT/BT/HS konfiguracije sustava, te razmatraju normalizirani srednji dnevni profil opterećenja. Simulacije rada sustava su izvršene za vremenski period od 25 godina. Životni vijek baterije određuju brojanjem ciklusa punjenja i pražnjenja, dok je životni vijek FC i elektrolizatora određen brojanjem radnih sati i brojanjem ciklusa uključivanja i isključivanja. Svaki radni sat FC-a je razmatran kao pad napona radne karakteristike od 0.54 mV, međutim, degradacija i pad kapaciteta uslijed degradacije FC-a nisu razmatrani. Autori nastavljaju svoje istraživanje i u [26], gdje je razmatran normalizirani srednji dnevni profil opterećenja uz sezonske oscilacije i iste metode određivanja životnog vijeka komponenata sustava. Prema istim metodama određivanja životnog vijeka komponenata i za isti vremenski period od 25 godina, korištenjem programskog paketa MATLAB, Torreglosa i sur. su izvršili analizu rada PV/WT/BT/HS konfiguracije sustava u [28, 29, 59], a García-Triviño i sur. u [6] za PV/WT/BT/HS/EG konfiguraciju sustava.

Ozden i Tari [35] provode tehno-ekonomsku analizu PV/HS konfiguracije sustava, te razmatraju utjecaj degradiranog FC-a na performanse sustava. Međutim, u radu se ne razmatra utjecaj dinamike degradacije na rad sustava. Simulacija rada sustava je izvršena korištenjem programskog paketa TRNSYS za vremenski period od jedne godine. Razmatrani profil opterećenja krajnjeg korisnika se odnosi na odjel hitne pomoći pri ekstremnim uvjetima.

Dinamika gubitka kapaciteta baterije, prema modelu težinske energije koja prođe kroz bateriju, je razmatrana u [60], gdje autori vrše socio-ekonomsku analizu PV/WT/BT/DG konfiguracije sustava. Simulacije rada sustava su izvršene za vremenski period od 5 godina, te je razmatran stohastički profil opterećenja krajnjeg korisnika.

Tablica 2.2 prikazuje sažeti pregled korištenih programskih paketa/alata, razmatranih profila opterećenja, vremenskih perioda i metoda za određivanje životnog vijeka komponenata sustava.

*Tablica 2.2: Pregled programskih paketa/alata, razmatranih profila opterećenja, vremenskih perioda i metoda za određivanje životnog vijeka komponenata sustava*

Literatura	Konfiguracija sustava	Programski paket/alat	Razmatrani vremenski period	Profil opterećenja	Životni vijek komponenata sustava
Tito i sur. 2016 [45]	PV-WT-BT	-	1 godina	Šest različitih socio-demografskih profila opterećenja krajnjeg korisnika	Predodređen životni vijek baterije (ne navodi se vrijednost).
Ma i Javed 2019 [61]	PV-WT-BT	MATLAB	1 godina	Profil opterećenja kućanstva	Životni vijek baterije predodređen na 5 godina.

Emad i sur. 2021 [58]	PV-WT-BT	MATLAB	1 godina	Normalizirani dnevni profil opterećenja	Životni vijek baterije predodređen na 5 godina.
Mahesh i sur. 2022 [71]	PV-WT-BT-EV	-	1 godina	Profil opterećenja kućanstva, razmatrano i punjenje električnih vozila	Životni vijek baterije predodređen na 10 godina.
Rahimi i sur. 2014 [16]	WT-HS	-	1 godina	Profil opterećenja kućanstva	Predodređen životni vijek FC i elektrolizatora na 10 godina.
Baghaee i sur. 2016 [13]	PV-WT-HS	MATLAB	1 godina	Profil opterećenja baziran na IEEE testu pouzdanosti sustava	Predodređen životni vijek elektrolizatora na 20 godina i FC na 5 godina.
Ozden i Tari 2017 [35]	PV-HS	TRNSYS	1 godina	Profil opterećenja odjela hitne pomoći (ekstreman slučaj)	Ne razmatra se životni vijek komponentata, ali se razmatra utjecaj degradiranog FC uređaja na performanse sustava.
Ghenai i sur. 2018 [14]	PV-HS	-	1 godina	Normaliziran profil opterećenja stambene zajednice	Predodređen životni vijek elektrolizatora na 15. Kraj životnog vijeka FC određen brojanjem radnih sati.
Zhang i sur. 2019 [53]	PV-WT-HS	MATLAB	1 godina	Profil opterećenja grada Khorasan, Iran	Predodređen životni vijek FC i elektrolizatora na 5 godina.
Khan i Javaid 2020 [15]	PV-WT-HS	MATLAB	1 godina	Stohastički profil opterećenja	Predodređen životni vijek FC i elektrolizatora na 5 godina.
Zhang i sur. 2022 [62]	PV-WT-HS	MATLAB	1 godina	Profil opterećenja kućanstva	Predodređen životni vijek FC na 5 godina i elektrolizatora na 10 godina.
Castañeda i sur. 2013 [23]	PV-BT-HS	MATLAB Simulink	1 godina	Normalizirani dnevni profil opterećenja	Kraj životnog vijeka baterije određen brojanjem ekvivalentnog broja ciklusa punjenja i pražnjenja baterije. Kraj životnog vijeka FC i elektrolizatora određen brojanjem radnih sati.
García i sur. 2013 [25]	PV-WT-BT-HS	MATLAB Simulink	25 godina	Normalizirani dnevni profil opterećenja	Kraj životnog vijeka baterije određen brojanjem ekvivalentnog broja ciklusa punjenja i pražnjenja baterije. Kraj životnog vijeka FC i elektrolizatora određen brojanjem radnih sati i ciklusa uključivanja i isključivanja.

García i sur. 2014 [26]	PV-WT-BT-HS	MATLAB Simulink	25 godina	Normalizirani dnevni i sezonski profil opterećenja	Kraj životnog vijeka baterije određen brojem ekvivalentnog broja ciklusa punjenja i pražnjenja baterije. Kraj životnog vijeka FC i elektrolizatora određen brojanjem radnih sati i ciklusa uključivanja i isključivanja.
Behzadi i Niasati 2014 [8]	PV-BT-HS	TRNSYS	1 godina	Normalizirani dnevni profil opterećenja	-
Torreglosa i sur. 2014 [28]	PV-WT-BT-HS	MATLAB Simulink	25 godina	Normalizirani dnevni profil opterećenja	Kraj životnog vijeka baterije određen brojem ekvivalentnog broja ciklusa punjenja i pražnjenja baterije. Kraj životnog vijeka FC i elektrolizatora određen brojanjem radnih sati.
Torreglosa i sur. 2015 [29]	PV-WT-BT-HS	MATLAB Simulink	25 godina	Normalizirani dnevni profil opterećenja	Kraj životnog vijeka baterije određen brojem ekvivalentnog broja ciklusa punjenja i pražnjenja baterije. Kraj životnog vijeka FC i elektrolizatora određen brojanjem radnih sati.
Torreglosa i sur. 2016 [59]	PV-WT-BT-HS	MATLAB Simulink	25 godina	Normalizirani dnevni i sezonski profil opterećenja	Kraj životnog vijeka baterije određen brojem ekvivalentnog broja ciklusa punjenja i pražnjenja baterije. Kraj životnog vijeka FC i elektrolizatora određen brojanjem radnih sati i ciklusa uključivanja i isključivanja.
Hosseinalizadeh i sur. 2016 [50]	PV-WT-BT-HS	MATLAB	1 godina	Konstantan profil opterećenja	Predodređen životni vijek baterije na 5 godina i elektrolizatora na 20 godina. Kraj životnog vijeka FC-a određen brojanjem radnih sati.
Eriksson i Gray 2019 [55]	PV-WT-BT-HS	-	1 godina	Normalizirani dnevni profil opterećenja	Predodređen životni vijek baterije na 5 godina i elektrolizatora 10 godina. Kraj životnog vijeka FC određen brojanjem radnih sati.

Rullo i sur. 2019 [68]	PV-WT-BT-HS	MATLAB	1 godina	Profil opterećenja poslovne zgrade srednje veličine	Kraj životnog vijeka baterije određen brojenjem ekvivalentnog broja ciklusa punjenja i pražnjenja baterije. Kraj životnog vijeka FC i elektrolizatora određen brojanjem radnih sati.
Morocco i sur. 2021 [47]	PV-BT-HS	-	1 godina	Profil opterećenja kućanstva	Kraj životnog vijeka baterije je određen prema ukupnoj energiji koja prođe kroz bateriju. Kraj životnog vijeka FC i elektrolizatora određen brojanjem radnih sati i ciklusa uključivanja i isključivanja.
Morocco i sur. 2022 [69]	PV-WT-BT-HS-DG	-	1 godina	Profil opterećenja kućanstva	Kraj životnog vijeka baterije je određen prema ukupnoj energiji koja prođe kroz bateriju. Kraj životnog vijeka FC i elektrolizatora određen brojanjem radnih sati i ciklusa uključivanja i isključivanja.
Kilic i Altun 2023 [34]	PV-WT-BT-HS	TRNSYS	20 godina	Normalizirani dnevni profil opterećenja	Predodređen životni vijek baterije na 12 godina, elektrolizatora na 15 godina i FC na 10 godina.
Zhang i sur. 2020 [48]	PV-WT-BT-HS	MATLAB	24 h	Impulsni profil opterećenja	Predodređen životni vijek baterije na 5 godina, FC na 10 godina i elektrolizatora na 5 godina.
Human i sur. 2019 [70]	PV-WT-BT-EL	MATLAB	25 godina	-	Kraj životnog vijeka baterije je određen kumulativnom metodom brojanja ciklusa punjenja i pražnjenja. Kraj životnog vijeka elektrolizatora određen brojanjem radnih sati.
García-Triviño i sur. 2016 [6]	PV-WT-BT-HS-EG	MATLAB	25 godina	-	Kraj životnog vijeka baterije je određen prema ukupnoj energiji koja prođe kroz bateriju. Kraj životnog vijeka FC i elektrolizatora određen brojanjem radnih sati.
Dufo-López i sur. 2016 [60]	PV-WT-BT-DG	-	5 godina	Stohastički profil opterećenja	Životni vijek baterije je određen modelom težinskog protoka energije kroz bateriju. Model razmatra gubitak kapaciteta baterije u vremenu.

He i sur. 2022 [67]	PV-WT-BT-HS-HP	MATLAB	1 godina	Normalizirani dnevni profil opterećenja	Predodređen životni vijek baterije na 10 godina, elektrolizatora na 20 godina i FC na 15 godina.
Kumar i sur. 2023 [72]	PV-HP-BM-BT-EG	MATLAB	1 godina	Normalizirani dnevni profil opterećenja	Kraj životnog vijeka baterije je određen prema ukupnoj energiji koja prođe kroz bateriju.
Bezmalinović i sur. 2013 [36]	PV-BT PV-BT-DG PV-BT-FC PV-BT-HS	HOMER	1 godina	Konstantan profil opterećenja, mobilna bazna stanica	Predodređen životni vijek baterije i elektrolizatora na 10 godina. Kraj životnog vijeka FC-a određen brojanjem radnih sati.
Khan i sur. 2017 [11]	PV-WT-BT-DG PV-WT-BT PV-WT-DG	HOMER	1 godina	Profil opterećenja različitih mobilnih baznih stanica u pokrajini Punjab, Indija	-
Hossain i sur. 2017 [10]	PV-WT-BT-DG	HOMER	1 godina	Srednji dnevni i sezonski profil opterećenja odmarališta na otoku Berjaya, Malaysia	Kraj životnog vijeka baterije je određen prema ukupnoj energiji koja prođe kroz bateriju.
Duman i Güler 2018 [2]	PV-WT-BT PV-WT-BT-DG PV-WT-HS PV-WT-HS-DG	HOMER	1 godina	Sezonski profil opterećenja kućanstva	Kraj životnog vijeka baterije je određen prema ukupnoj energiji koja prođe kroz bateriju. Kraj životnog vijeka FC-a određen brojanjem radnih sati. Predodređen životni vijek elektrolizatora na 15 godina.
Babaei i sur. 2022 [63]	PV-WT-BT-DG	HOMER	1 godina	Profil opterećenja zapadnog Pelee otoka, Kanada	Životni vijek baterije predodređen na 15 godina.
Qi i sur. 2022 [64]	PV-WT-BT-DG	HOMER	1 godina	Profil opterećenja otoka u Qingdaou, Kina	Životni vijek baterije predodređen na 10 godina.

## 2.2. Dimenzioniranje samostalnih hibridnih energetske sustava

Dimenzioniranje HRES-a je složen problem, jer ovisi o poznavanju vremenskih uvjeta, profilu opterećenja, tehničkim specifikacijama i uvjetima okoline za koju se vrši dimenzioniranje sustava. Ako se na sve to još dodaju i parametri strategije upravljanja energijom unutar sustava, problem dizajniranja, dimenzioniranja i analize HRES-a postaje još složeniji [44]. Pravilno dimenzioniranje HRES je neophodno za pravilan rad sustava. Predimenzionirane komponente

sustava će nepotrebno povećati troškove sustava, te se mogu dogoditi nepotrebni viškovi ne iskorištene energije, dok će poddimenzioniran sustav uzrokovati nedostatak energije i prekid rada sustava. Istraživanja na temu dimenzioniranja i optimiranja različitih konfiguracija HRES su izvršena za razne lokacije i rubne uvjete [44, 73–76].

Metode dimenzioniranja HRES-a se mogu podijeliti u četiri grupe: konvencionalna metoda dimenzioniranja; dimenzioniranje pretraživanjem zadanog polja; dimenzioniranje korištenjem programskih alata; dimenzioniranje optimizacijom algoritmima umjetne inteligencije (*engl. Artificial Intelligence, AI*).

### **2.2.1. Konvencionalne metode dimenzioniranja**

Konvencionalnom metodom dimenzioniranja se jednostavno, uz poznavanje opterećenja i resursa obnovljivih izvora energije, može doći do brzog rješenja kapaciteta svih komponenata sustava, kako što je prezentirano u [16]. Neki autori imaju pristup rješavanja problema preko koeficijenta iskorištenja kapaciteta [8, 22], dok neki autori, uz opterećenje i radne karakteristike komponenata, uzimaju u obzir i parametre logike upravljanja HRES [32]. Prednost konvencionalnih metoda dimenzioniranja su jednostavnost i brzo dobivanje rješenja traženih kapaciteta. Glavni nedostatak ove metode je što se ne može u potpunosti obuhvatiti problem povezivanja parametara nepredvidljivosti obnovljivih izvora energije, profila opterećenja i radnih karakteristika svih komponenata.

### **2.2.2. Dimenzioniranje pretraživanjem zadanog polja**

Dimenzioniranje pretraživanjem zadanog polja (PP) je jednostavna metoda koja se postavlja tako da se zada područje pretraživanja kapaciteta svake komponente HRES-a, te se prema zadanom koraku promjene pojedinog kapaciteta vrše simulacije za sve moguće kombinacije, pa se prema postavljenom kriteriju bira najbolje rješenje [14, 50]. Nedostaci ove metode dimenzioniranja su što najbolje dobiveno rješenje nije nužno i optimalno rješenje sustava, te što ovisno o broju kombinacija proces pretraživanja može bit jako dugotrajan.

### **2.2.3. Dimenzioniranje korištenjem programskih alata**

Trenutno je dostupno nekoliko komercijalnih programskih alata za dimenzioniranje i simuliranje režima rada HRES-a, od kojih su najčešće korišteni HOMER i HOGA [44, 73, 75, 77].

HOMER (*engl. Hybrid Optimization of Multiple Electric Renewables*) je sučelje koje omogućava dimenzioniranje i simuliranje rada HRES-a [44, 75, 78]. U osnovi, HOMER je softver za simuliranje rada HRES-a, pa tako može izvršiti simulaciju rada stotine ili tisuće različitih HRES konfiguracija, u ovisnosti o načinu postavljenja problema. Simulacije se vrše na razmatrani vremenski period od jedne godine, u vremenskim koracima od jedne minute do jednog sata [78]. Baza podataka sadrži široki spektar komercijalnih proizvoda sa svim pripadajućim radnim karakteristikama, te ulazne podatke Sunčevog zračenja i brzina vjetra za lokacije širom svijeta. HOMER je jedan od najkorištenijih komercijalnih simulatora, a razlog tome su jednostavnost korištenja i mogućnost usporedbe niza različitih rješenja [44, 75]. Funkcija cilja optimizacije je ekonomskog tipa, minimalizacija neto troška sustava [77].

HOMER je korišten za simulaciju i optimizaciju raznih HRES konfiguracija u [2, 36], a u [8, 22] je uspoređivan s drugim metodama dimenzioniranja sustava. Lacko i ostali [37] korištenjem HOMER-a traži izvedivo HRES rješenje, za kućanstvo na udaljenoj lokaciji bez pristupa energetske mreže u Sloveniji.

Nedostatak HOMER-a je što se optimizacija sustava vrši samo za funkciju cilja minimalnog neto troška sustava, kao i nedostatak preciznijih modela degradacije, prvenstveno baterije. Isto tako, sučelje nije dovoljno intuitivno, te ne dopušta korisniku da vrši izmjene na postojećim modelima.

HOGA (*engl. Hybrid Optimization by Genetic Algorithms*) je sučelje za simulaciju i optimizaciju HRES-a. Sučelje uključuje simulator na vremenski korak do jedne minute, s bibliotekom modela radnih karakteristika i mehanizama degradacije raznih elemenata, te višeciljnu GA optimizaciju [75, 77, 79]. Posebno se ističe model degradacije kapaciteta baterije. HOGA također omogućava provođenje analize osjetljivosti, analizu vjerojatnosti, te mogućnost primjene različitih strategija upravljanja energijom [77, 79]. HOGA je pogodna za simuliranje sustava visokih i niskih nazivnih snaga, te može simulirati i optimizirati HRES i sustave spojene na energetska mrežu.

U literaturi se u svrhu dimenzioniranja HRES-a navodi korištenje SDO-a [22, 23, 25, 26, 28, 29]. SDO (*engl. Simulink Design Optimization*) je dio MATLAB programskog paketa, kojim se vrši simuliranje i optimizacija sustava. SDO pruža razne funkcije, interaktivne alate, blokove za provođenje analiza i podešavanje parametara, te može vršiti analizu osjetljivosti [80]. Moguće je korištenje stohastičkih metoda, kao što je Monte Carlo, ili evolucijskih algoritama, kao što je GA [22, 80]. Optimizacija kojom se vrši dimenzioniranje je s tehničkom funkcijom



cilja, pa se stoga ekonomski aspekt HRES-a ne uzima u obzir, što je ujedno i najveći nedostatak korištenja SDO-a [22].

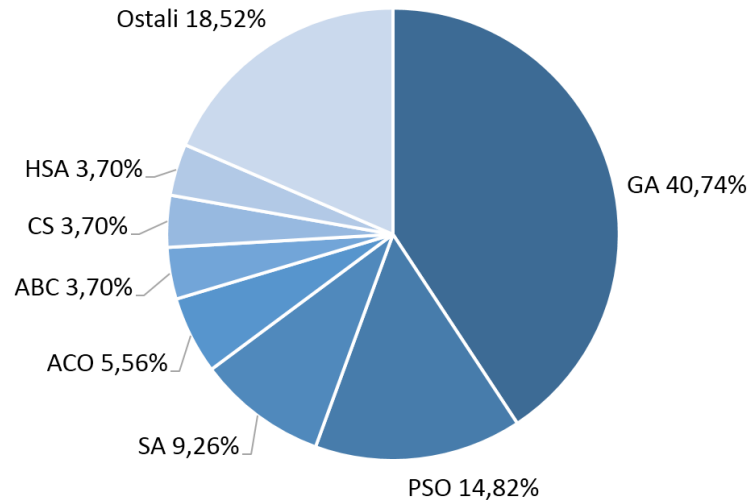
Osim HOMER i HOGA, postoje i druga komercijalna sučelja za dimenzioniranje i simulaciju rada HRES-a, kao što su HYBRID2, HYBRIDS, INSEL, SOLSIM, ARES itd. [44, 75, 77]. TRNSYS sučelje se također može koristiti u svrhu ekonomske optimizacije HRES-a, dodavanjem serije HYDROGEMS biblioteka [44].

#### **2.2.4. Dimenzioniranje korištenjem algoritama umjetne inteligencije**

U usporedbi s izravnim metodama dimenzioniranja, AI algoritmi mogu riješiti ne linearne probleme, te nije potreban pristup vremenskim podacima [44, 75]. U literaturi su korišteni razni AI algoritmi s jednim ciljem [15, 17, 38, 45, 47, 81] ili više ciljeva optimizacije [13, 55, 70], korištenjem jednog algoritma [13, 15, 17, 38, 45, 47, 55] ili više algoritama u kombinaciji [70, 81], kako bi se nadišla ograničenja pojedinog algoritma. Neki od tih algoritama su genetski algoritam (*engl. Genetic Algorithm, GA*), optimizacija rojem čestica (*engl. Particle Swarm Optimization, PSO*), simulirano žarenje (*engl. Simulated Annealing, SA*) [44, 73–75].

GA je evolucijski algoritam pretraživanja kojim se oponaša proces prirodne selekcije, kako bi se došlo do optimalnog rješenja. GA također oponaša i prirodne procese mutacije i križanja. Prednosti korištenja GA su mogućnost rješavanja problema s višestrukim rješenjima, jednostavna implementacija na postojeće simulatore, mogućnost kombiniranja s drugim AI algoritmima [44, 73, 75], zbog čega je postao najkorišteniji AI algoritam za dimenzioniranje HRES-a, slika 2.2. Neki od nedostataka GA su sklonost konvergencije lokalnom optimumu i vrijeme potrebno za postizanje optimalnog rješenja.

U [38] autori uspoređuju GA s sučeljem HOMER, dok se u [15] GA uspoređuje s PSO, BSA (*engl. Backtracking Search Algorithm*) i JAYA algoritmom. BSA je evolucijski algoritam vođen memorijom koji, kao i GA, koristi selekciju, križanje i mutaciju za pronalaženje optimalnog rješenja [15]. JAYA je populacijski algoritam za optimizaciju bez gradijenta, koji nekoliko puta modificira populaciju pojedinačnih rješenja, kako bi postigao optimalno rješenje [82]. Human i ostali [70] GA kombiniraju s SPEA (*engl. Strength Pareto Evolutionary Algorithm*) u svrhu optimalnog upravljanja i dimenzioniranja sustava, dok se u [81] GA kombinira s SA.



Slika 2.2: Omjer korištenja optimizacijskih AI algoritama u svrhu dimenzioniranja HRES-a [75]

PSO algoritam je evolucijski algoritam koji je nastao iz proučavanja predatorskog ponašanja jata ptica i riba [75]. PSO se ne koristi mehanizmima mutacije i križanja, kao GA, pa je stoga rad algoritma jednostavniji, zbog čega je konvergencija optimalnog rješenja brža [44, 75]. Jednostavnost korištenja, brza konvergencija i visoka preciznost su razlozi zašto je PSO jedan od najkorištenijih AI algoritama za optimizaciju HRES-a [44, 73, 75], slika 2.2. Nedostatak PSO algoritma je što ne može riješiti probleme nekoordiniranih sustava, te je podložan rješenjima lokalnog optimuma [44, 75].

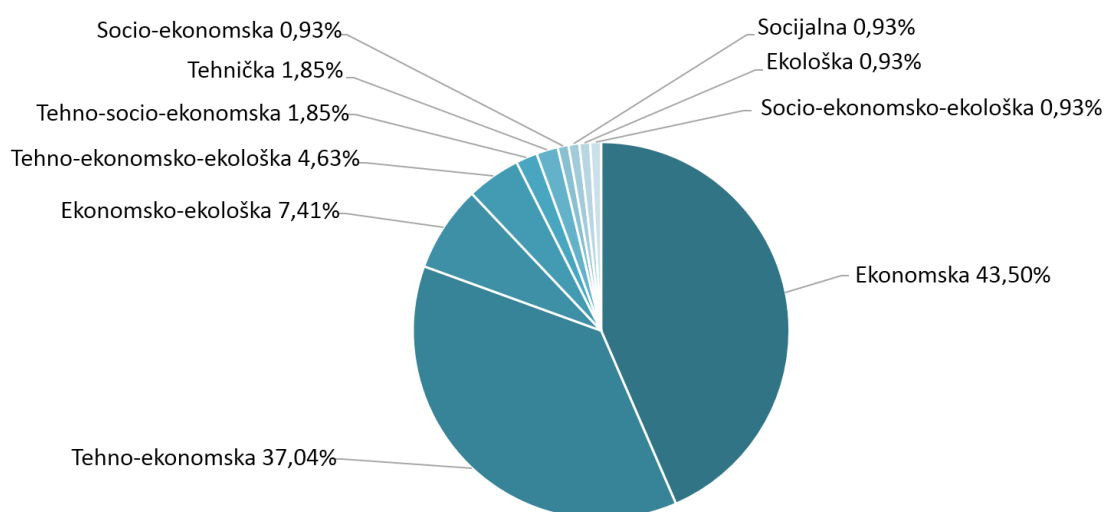
Marocco i ostali [47] korištenjem PSO algoritma vrše dimenzioniranje HRES, prema ekonomskoj funkciji cilja, minimum cijene korisne energije. U [13, 55] je prezentirana višeciljna optimizacija HRES-a korištenjem samo PSO algoritma. Usporedba PSO i DE algoritma (*engl. Differential Evolution*) je prezentirana u [17]. DE je populacijski algoritam koji se koristi vektorima kao jedinkama populacije, te primjenjuje mehanizme selekcije, križanja i mutacije [17].

SA je robustan algoritam nasumičnog pretraživanja koji može riješiti ne linearne i kaotične probleme s mnogo ograničenja, oponašanjem procesa žarenja metala [44, 75]. Najveća prednost SA algoritma je što može izbjeći lokalne optimume, dok je nedostatak što kvaliteta konačnog rješenja može biti loša [44, 75]. SA je korišten u [83] za dimenzioniranje HRES preko tehničke funkcije cilja.

Osim poviše navedenih AI algoritama, u literaturi se također može pronaći primjere korištenja ACO (*engl. Ant Colony Optimization*), CS (*engl. Cuckoo Search*), ABC (*engl. Artificial Bee*

Colony), HSA (engl. *Harmony Search Algorithm*) algoritama, u svrhu dimenzioniranja HRES-a [44, 73–76].

Svaka HRES konfiguracija za razmatrani profil opterećenja može imati više od jednog prihvatljivog rješenja dimenzija kapaciteta sustava. Za postizanje najboljeg rješenja, prema potrebama korisnika, potrebno je postaviti adekvatnu funkciju ili funkcije cilja, prema kojima će se vršiti usporedba svih mogućih rješenja optimizacije. Korištene funkcije cilja su tehničkog, ekonomskog, ekološkog i socijalno-političkog tipa, od kojih je ekonomski tip funkcije cilja najčešće korišten pri optimizaciji s jednom funkcijom cilja, a tehno-ekonomski cilj za višeciljnu optimizaciju [75], slika 2.3. Najčešće se koriste funkcije cilja minimuma cijene energije, minimuma korisne energije i minimuma neto troška sustava za ekonomski tip, dok pouzdanost sustava definirana preko mogućnosti zadovoljavanja opterećenja najčešće korišteni tehnički tip funkcije cilja [75].



Slika 2.3: Omjer korištenih funkcija cilja u svrhu dimenzioniranja HRES-a [75]

### 2.2.5. Pregled istraživanje

Zhou i ostali [32] predlažu konvencionalnu metodu dimenzioniranja za PV/BT/HS konfiguraciju sustava, u svrhu brze procjene kapaciteta svih sastavnih komponenata sustava. Za svaku od sastavnih komponenata sustava je predložena jednačba za dimenzioniranje kapaciteta, površine ili snage. Jednačbe obuhvaćaju parametre opterećenja, sunčevog zračenja, učinkovitosti, parametre upravljanja i marginalne koeficijente. Marginalnim koeficijentima se kompenzira ne poklapanje proizvodnje energije i profila opterećenja. Metoda dimenzioniranja je demonstrirana za dva razmatrana slučaja.

Cano i ostali [22] uspoređuju četiri metode dimenzioniranja za PV/WT/BT/HS konfiguraciju sustava. Prva metoda je konvencionalna metoda dimenzioniranja. PV i WT su dimenzionirani prema potrebama opterećenja i faktora iskorištenja kapaciteta, dok je FC dimenzioniran prema najvećem mogućem opterećenju uz sigurnosni faktor od 20%, a elektrolizator za najveći mogući višak energije. Kapacitet baterije je dimenzioniran tako da se iz baterije može zadovoljiti opterećenja na vremenski period od 24 sata, bez proizvedene energije iz PV i WT ili rada FC. Preostale tri metode su korištenjem programskih alata SDO, gdje je izvršena tehnička optimizacija bez ekonomskog cilja, HOMER, gdje je dimenzioniranje izvršeno prema ekonomskoj funkciji cilja i HOGA, gdje je izvršena GA optimizacija s ekonomskom funkcijom cilja. Rezultati su pokazali da se svakom od metoda dimenzioniranja dobivaju kapaciteti sustava za postizanje pouzdanog i neprekinutog rada sustava, dok se SDO metodom postižu najbolja rješenja.

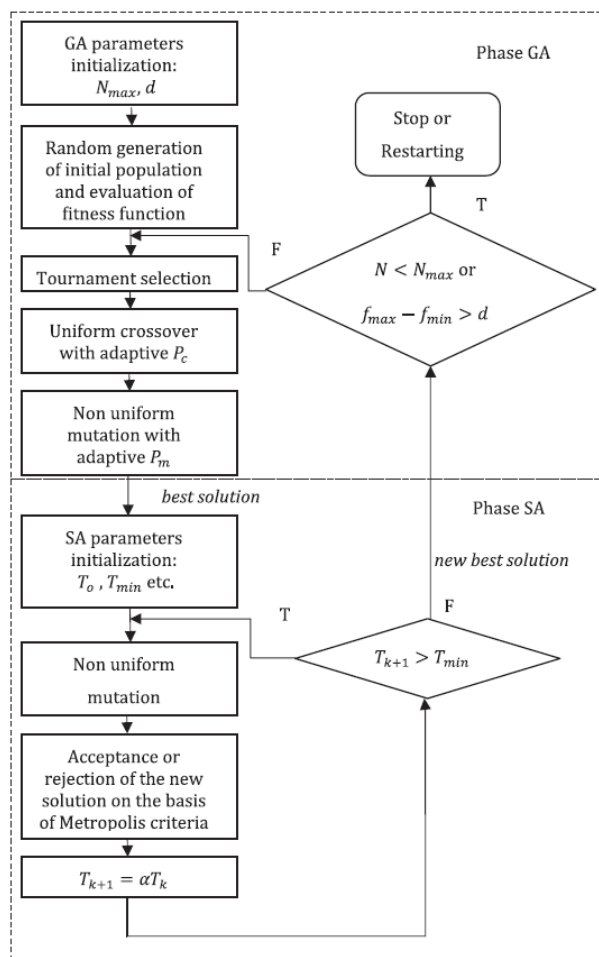
Tri metode dimenzioniranja sustava su uspoređene u [8], za PV/BT/HS konfiguraciju sustava. Prva metoda dimenzioniranja je konvencionalna metoda, postavljena kao i u [22], druga metoda je korištenjem HOMER sučelja, a treća korištenjem HOGA sučelja. Rezultati istraživanja su pokazali da je konvencionalna metoda nepouzdana, te da se prilikom rada sustava SoC i razina vodika u spremniku često nalaze u području minimuma, što je izazvalo energetske gubitke i prekide rada sustava.

Rahimi i ostali [16] su primijenili konvencionalnu metodu dimenzioniranja za WT/HS konfiguraciju sustava. Dimenzioniranje sustava je izvršeno za pet različitih lokacija, prema maksimalnim energetskim potrebama opterećenja za svaku od promatranih lokacija. Za dimenzioniranje duljine lopatice rotora WT su korištene srednje mjesečne brzine vjetra uz faktor sigurnosti od 30%, pa je iz podataka proizvedene energije i energije opterećenja određen energetski višak, prema kojem je određen nazivni kapacitet elektrolizatora. Spremnik vodika je dimenzioniran prema nazivnom proizvodnom kapacitetu elektrolizatora, a FC je dimenzioniran za najveće moguće opterećenje. Rezultati su pokazali da je WT predimenzionirana, što je rezultiralo porastom sveukupnih troškova sustava.

Tito i sur. [45] uspoređuju GA i GA-PP kombinaciju za dimenzioniranje PV/WT/BT konfiguracije sustava. Postavljena je ekonomska funkcija cilja, minimalan neto trošak sustava. Za GA-PP kombinaciju, GA je najprije korišten za dobivanje brze procjene optimalnog rješenja, te se prema toj procjeni određuje polje pretraživanja za PP metodu. PP metodom se zatim pretražuju sva postojeća rješenja, unutar zadanog polja, koja su u stanju zadovoljiti potrebe

opterećenja. U konačnici su postignuta jednaka rješenja korištenje obje metode dimenzioniranja.

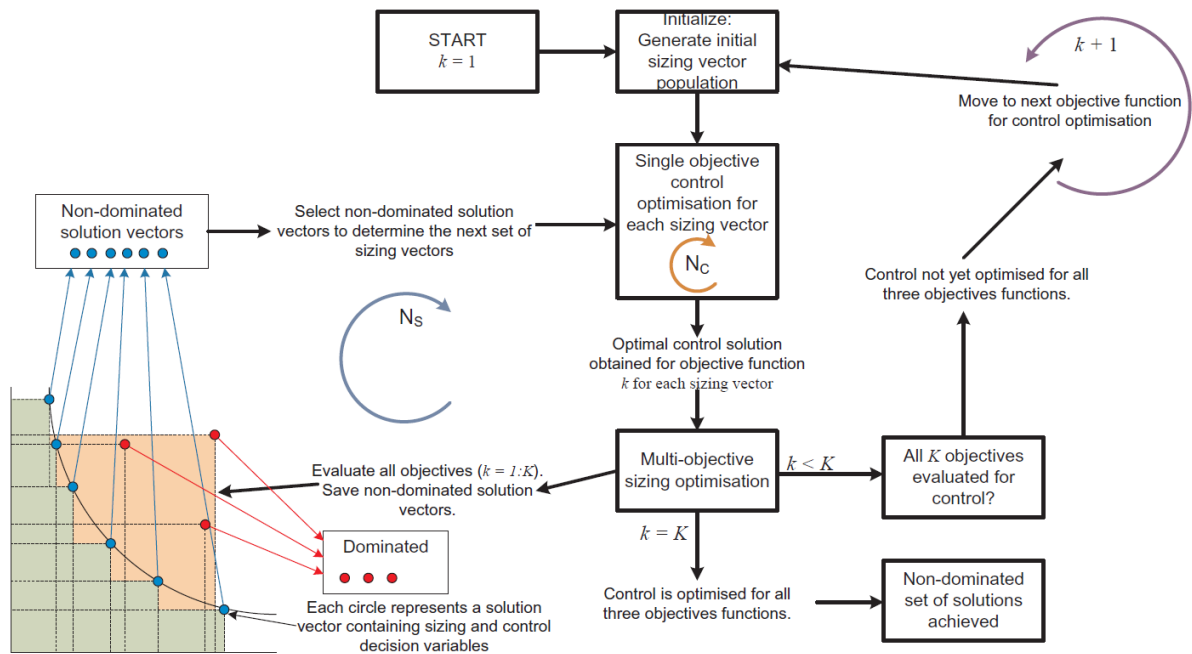
Carapellucci i ostali [81] vrše dimenzioniranje PV/WT/BT/HS konfiguracije sustava, u kombinaciji s malom hidroturbinom (*engl. Hydro Power Plant, HP*), korištenjem kombinacije GA-SA algoritma. Postavljena je ekonomska funkcija cilja, minimum cijene energije. Optimizacija se vrši u dvije faze, gdje je GA prva faza, a SA druga faza optimizacije. U prvoj fazi se stvara populacija, za koju se zatim vrše procesi selekcije, križanja i mutacije, dok se u drugoj fazi optimalno rješenje dobiveno GA optimizacijom podliježe SA procesu, kako bi se postiglo još bolje rješenje, slika 2.4. Konačno rješenje je proslijeđeno GA za dobivanje nove populacije.



Slika 2.4: Dijagram toka hibridnog GA-SA algoritma [81]

Human i ostali [70] istražuju metodu za optimalno dimenzioniranje i upravljanje sustava za proizvodnju vodika, za tri različite lokacije, kombinacijom GA-SPEA algoritma. Izvršena je tehno-ekonomska optimizacija s tri funkcije cilja: energetska učinkovitost sustava; minimum godišnjeg troška životnog ciklusa sustava; pouzdanost sustava, definirana preko životnog vijeka

komponentata. U prvoj fazi se korištenjem GA optimiranju parametri upravljanja sustava, prema jednoj funkciji cilja, a zatim se u drugoj fazi vrši višeciljna optimizacija korištenjem SPEA, slika 2.5. rezultati su pokazali da se kombiniranjem optimizacije upravljanja i dimenzioniranja sustava za postavljene tri funkcije cilja postižu bolji rezultati, uslijed uzajamne povezanosti.

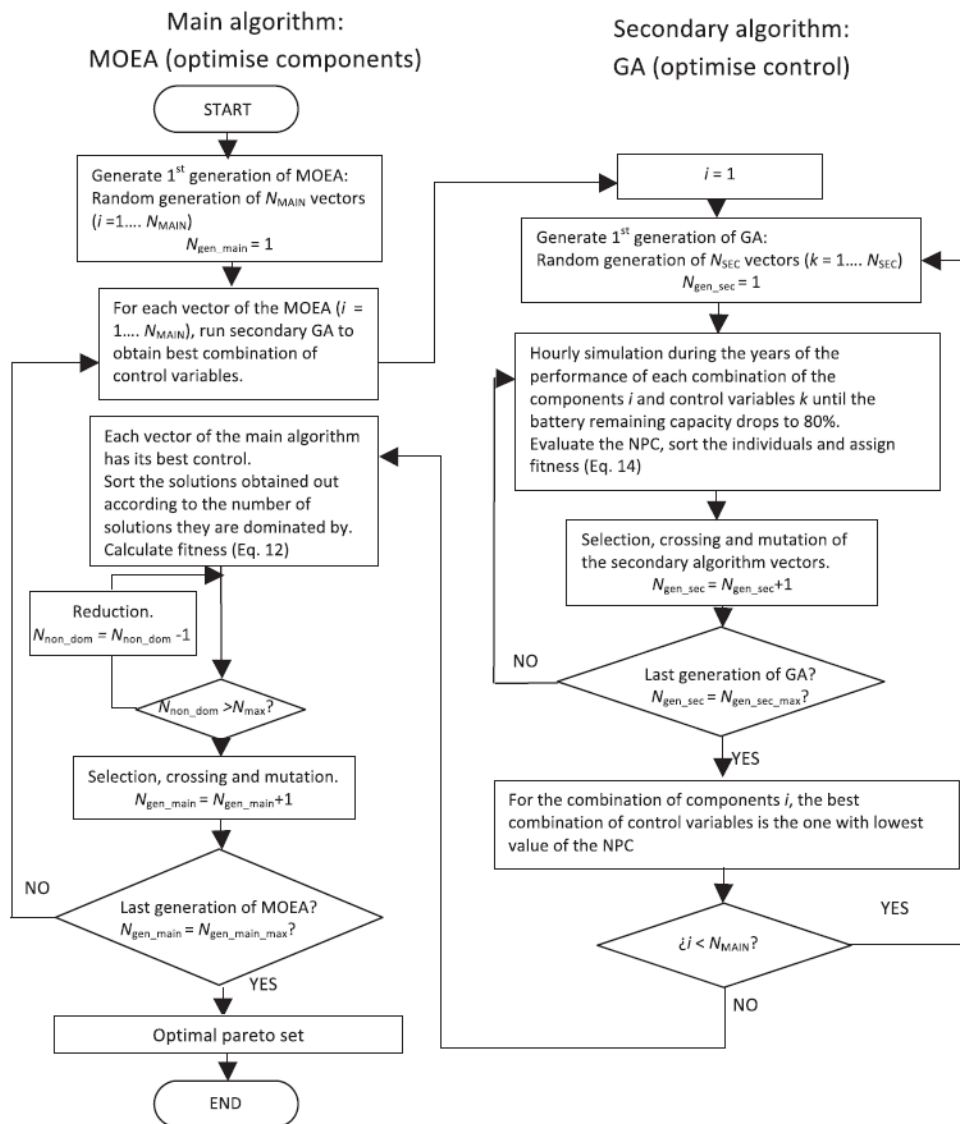


Slika 2.5: Dijagram toka procesa optimizacije [70]

Usporedba HOMER sučelja i GA, za dimenzioniranje više konfiguracija HRES-a (tablica 2.3) u kombinaciji s bio masom (BM), je istražena u [38]. Autori su razmatrali ekonomsku funkciju cilja, minimalan neto trošak sustava. Rezultati su pokazali da se GA optimizacijom postižu bolja rješenja, nego korištenjem HOMER sučelja.

Tehno-ekonomska optimizacija, korištenjem GA, s dvije funkcije cilja je prezentirana u [68] za PV/WT/BT/HS konfiguraciju sustava. Prva funkcija cilja je pouzdanost sustava, definirana preko mogućnosti zadovoljavanja potreba opterećenja, a druga je minimum korisne energije.

U [60] autori kombiniraju višeciljni evolucijski algoritam (*engl. Multi-Objective Evolutionary Algorithm, MOEA*) i GA za dimenzioniranje PV/WT/BT/DG konfiguracije sustava, slika 2.6. Višeciljna optimizacija je izvršena prema tri socio-ekonomske funkcije cilja: minimalni neto trošak sustava; mogućnost stvaranja novih radnih mjesta; socijalni indeks ljudskog razvoja. MOEA se koristi za dobivanje Pareto granice optimalnih rješenja komponenti sustava, dok se GA koristi za dobivanje optimalne strategije upravljanja energijom za svaku od kombinacija rješenja dobivenih MOEA.



Slika 2.6: Dijagram toka hibridnog MOEA-GA algoritma [60]

Sanchez i ostali [17] uspoređuju SPO i DE algoritme za dimenzioniranje PV/WT/HS konfiguracije sustava, preko ekonomske funkcije cilja, minimum cijene energije. Rezultati su pokazali da se korištenjem PSO algoritma postiže brža konvergencija rješenja, nego DE algoritmom. Također, PSO algoritmom se postilo bolje rješenje HRES konfiguracije.

Tehno-ekonomska optimizacija, korištenjem PSO algoritma, s dvije funkcije cilja je prezentirana u [13], za PV/WT/HS konfiguraciju sustava. Prva funkcija cilja je minimalan neto trošak sustava, a druga pouzdanost sustava, definirana preko mogućnosti zadovoljavanja potreba opterećenja. Set dobivenih optimalnih rješenja je prikazan Pareto granicom.

García-Triviño i sur. [6] koriste PSO algoritam kako bi izvršili tehno-ekonomsku višeciljnu optimizaciju PV/WT/BT/HS/EG konfiguracije sustava. Razmatrane su tri funkcije cilja:

energetska učinkovitost sustava; minimum godišnjeg troška životnog ciklusa sustava; pouzdanost sustava, definirana preko životnog vijeka komponenata. Postavljene funkcije cilja su jedna drugoj kontradiktorne, pa se stoga u istraživanju izvršena normalizacija razmatranih funkcija cilja, te su korišteni težinski faktori kako bi se sve razmatrane funkcije cilja objedinile u jednu funkciju cilja i dobilo jedno konačno rješenje optimizacije.

Eriksson i Gray [55] korištenjem PSO algoritma vrše višeciljnu optimizaciju PV/WT/BT/HS konfiguracije sustava. Ciljevi optimizacije su tehno-ekonomskog, ekološkog i socijalno-političkog tipa: pouzdanost sustava, definirana preko mogućnosti zadovoljavanja potreba opterećenja; minimum cijene korisne energije; minimum emisije CO<sub>2</sub>; socijalno-politički indeks, definiran kao omjer očekivanog zadovoljstva šire javnosti s prihvaćanjem HRES-a. Socijalno-politički cilj je uveden kao bi se pokazao određeni stav javnosti prema korištenju određenih komponenata sustava. Rezultati su pokazali kako se ovisno o socijalno-političkom indeksu može izbjeći korištenje društveno manje prihvatljivih komponenti.

Marocco i sur. [47] primjenom PSO algoritma vrše dimenzioniranje PV/BT/HS konfiguracije sustava prema ekonomskoj funkciji cilja minimuma korisne energije. Autori nastavljaju svoje istraživanje u [69] gdje ovog puta primjenjuju PSO algoritam za višeciljnu optimizaciju proširene PV/WT/BT/HS/DG konfiguracije sustava. dimenzioniranje je izvršeno prema ekonomsko-ekološkoj funkciji cilja, gdje je razmatrana minimalna cijena korisne energije i minimalne emisije CO<sub>2</sub>.

U [15] autori uspoređuju GA, PSO, BSA i JAYA algoritme u svrhu optimizacije PV/WT/HS konfiguracije sustava. Optimizacija je izvršena za ekonomsku funkciju cilja, minimum godišnjeg troška životnog ciklusa. Rezultati su pokazali da se sa svim ispitanim metodama postiže jednako optimalno rješenje. Međutim, brzina konvergencije optimalnog rješenja je postignuta najbrže s JAYA algoritmom.

Kumar i sur. [72] primjenjuju JAYA algoritam u svrhu višeciljnog dimenzioniranja PV/HP/BM/BT sustava spojenog na nepouzdanu energetska mrežu. Optimizacija je izvršena prema tehno-socio-ekonomskoj funkciji cilja: minimum cijene korisne energije; minimum emisija CO<sub>2</sub>; mogućnost stvaranja novih radnih mjesta. Rezultati istraživanja su pokazala da se s predloženom konfiguracijom sustava može uspješno podržati nepouzdanu energetska mrežu, te da se JAYA algoritam može efektivno koristiti za rješavanje kompleksnih realnih problema.

Emad i sur. [58] na primjeru dimenzioniranja PV/WT/BT konfiguracije sustava, prema tehno-ekonomskoj funkciji cilja, uspoređuju pet različitih metoda dimenzioniranja: HOMER; GA;



PSO; GWO (*engl. Grey Wolf Optimizer*); WHO (*engl. Wild Horse Optimizer*). Rezultati optimizacija su ocijenjeni prema minimumu cijene korisne energije i pouzdanosti sustava definirane preko mogućnosti sustava da zadovolji potrebe opterećenja. U usporedbi s ostalim razmatranim metodama, GWO se pokazao kao najbolja metoda dimenzioniranja, jer su ovom metodom postignute najniže vrijednosti cijene korisne energije za iste vrijednosti pouzdanosti sustava.

Kilic i Altun [34] koriste Taguchijev pristup za višeciljnu optimizaciju PV/WT/BT/HS konfiguraciju sustava, prema ekonomsko-ekološkoj funkciji cilja: minimalna cijena korisne energije; minimalna emisija CO<sub>2</sub>. Taguchijev pristup je brza i učinkovita statistička metoda za rješavanje dizajnerski problema, koja je izvorno korištena u svrhu poboljšanja kvalitete proizvoda [34].

Tablica 2.3 pruža sažeti pregled korištenih metoda dimenzioniranja i funkcija cilja.

*Tablica 2.3: Pregled metoda dimenzioniranja i funkcija cilja*

Literatura	Konfiguracija sustava	Metoda dimenzioniranja sustava	Funkcija cilja	
Zhou i sur. 2008 [32]	PV-BT-HS	Konvencionalna	Tehnička	Pouzdanost sustava, definirana preko mogućnosti zadovoljavanja potreba opterećenja
Rahimi i sur. 2014 [16]	WT-HS	Konvencionalna	Tehnička	Pouzdanost sustava, definirana preko mogućnosti zadovoljavanja potreba opterećenja
Cano i sur. 2014 [22]	PV-WT-BT-HS	Konvencionalna SDO	Tehnička	Pouzdanost sustava, definirana preko mogućnosti zadovoljavanja potreba opterećenja
		HOMER HOGA	Ekonomska	Minimalan neto trošak sustava
Behzadi i Niasati 2014 [8]	PV-BT-HS	Konvencionalna	Tehnička	Pouzdanost sustava, definirana preko mogućnosti zadovoljavanja potreba opterećenja
		HOMER HOGA	Ekonomska	Minimalan neto trošak sustava
Hosseinalizadeh i sur. 2016 [50]	PV-WT-BT-HS	PP	Ekonomska	Minimum cijene energije
Ghenai i sur. 2018 [14]	PV-HS	PP	Ekonomska	Minimum cijene energije
Bezmalinović i sur. 2013 [36]	PV-BT PV-BT-DG PV-BT-FC PV-BT-HS	HOMER	Ekonomska	Minimalna cijena korisne energije

Lacko i sur. 2014 [37]	PV-WT-HS	HOMER	Ekonomska	Minimalan neto trošak sustava
Duman i Güler 2018 [2]	PV-WT-BT PV-WT-BT-DG PV-WT-HS PV-WT-HS-DG	HOMER	Ekonomska	Minimalna cijena energije
Castañeda i sur. 2013 [23]	PV-BT-HS	SDO	Tehnička	Pouzdanost sustava, definirana preko mogućnosti zadovoljavanja potreba opterećenja
García i sur. 2013 [25]	PV-WT-BT-HS	SDO	Tehnička	Pouzdanost sustava, definirana preko mogućnosti zadovoljavanja potreba opterećenja
García i sur. 2014 [26]	PV-WT-BT-HS	SDO	Tehnička	Pouzdanost sustava, definirana preko mogućnosti zadovoljavanja potreba opterećenja
Torreglosa i sur. 2014 [28]	PV-WT-BT-HS	SDO	Tehnička	Pouzdanost sustava, definirana preko mogućnosti zadovoljavanja potreba opterećenja
Torreglosa i sur. 2015 [29]	PV-WT-BT-HS	SDO	Tehnička	Pouzdanost sustava, definirana preko mogućnosti zadovoljavanja potreba opterećenja
Carapellucci i Giordano 2012 [81]	PV-WT-BT-HS-HP	GA-SA	Ekonomska	Minimum cijene energije
Sanchez i sur. 2014 [17]	PV-WT-HS	SPO DE	Ekonomska	Minimum cijene energije
Tito i sur. 2016 [45]	PV-WT-BT	GA GA-PP	Ekonomska	Minimalan neto trošak sustava
Baghaee i sur. 2016 [13]	PV-WT-HS	PSO	Tehno- ekonomska	Dvije funkcije cilja: 1. Minimalan neto trošak sustava 2. Pouzdanost sustava, definirana preko mogućnosti zadovoljavanja potreba opterećenja
García-Triviño i sur. 2016 [6]	PV-WT-BT-HS-EG	PSO	Tehno- ekonomska	Tri funkcije cilja: 1. Energetska učinkovitost HRES-a 2. Minimum godišnjeg troška životnog ciklusa sustava 3. Pouzdanost sustava definirana životnim vijekom komponenata
Human i sur. 2019 [70]	PV-WT-BT-EL	GA-SPEA	Tehno- ekonomska	Tri funkcije cilja: 1. Energetska učinkovitost HRES-a 2. Minimum godišnjeg troška životnog ciklusa sustava 3. Pouzdanost sustava definirana životnim vijekom komponenata
Khan i Javaid 2020 [15]	PV-WT-HS	GA PSO BSA JAYA	Ekonomska	Minimum godišnjeg troška životnog ciklusa sustava

Eriksson i Gray 2019 [55]	PV-WT-BT-HS	PSO	Tehno- ekonomska Socijalno- politička Ekološka	Četiri funkcije cilja: 1. Pouzdanost sustava, definirana preko mogućnosti zadovoljavanja potreba opterećenja 2. Minimum cijene korisne energije 3. Minimum emisije CO <sub>2</sub> , definirana iz proizvodnje, dostave i održavanja sustava 4. Socijalno-politički indeks, definiran kao omjer očekivanog zadovoljstva šire javnosti s prihvaćanjem HRES-a
Suresh i sur. 2020 [38]	PV-WT-BT-HS-BM PV-WT-HS-BM PV-WT-BT-BM PV-WT-BM	HOMER GA	Ekonomska	Minimalan neto trošak sustava
Morocco i sur. 2021 [47]	PV-BT-HS	PSO	Ekonomska	Minimum cijene korisne energije
Ekren i Ekren 2010 [83]	PV-WT-BT	SA	Tehnička	Pouzdanost sustava, definirana preko mogućnosti zadovoljavanja potreba opterećenja
Rullo i sur. 2019 [68]	PV-WT-BT-HS	GA	Tehno- ekonomska	Dvije funkcije cilja: 1. Pouzdanost sustava, definirana preko mogućnosti zadovoljavanja potreba opterećenja 2. Minimalan neto trošak sustava
Morocco i sur. 2022 [69]	PV-WT-BT-HS-DG	PSO	Ekonomsko- ekološka	Dvije funkcije cilja: 1. Minimum cijene korisne energije 2. Minimum emisije CO <sub>2</sub> , definirana iz proizvodnje, dostave i održavanja sustava
Zhang i sur. 2022 [62]	PV-WT-HS	HSA	Ekonomska	Minimalan neto trošak sustava
Zhang i sur. 2020 [48]	PV-WT-BT-HS	BCA	Ekonomska	Minimalan neto trošak sustava
Hossain i sur. 2017 [10]	PV-WT-BT-DG	HOMER	Ekonomska	Minimalan neto trošak sustava
Khan i sur. 2017 [11]	PV-WT-BT-DG PV-WT-BT PV-WT-DG	HOMER	Ekonomska	Minimum cijene korisne energije
Babaei i sur. 2022 [63]	PV-WT-BT-DG	HOMER	Ekonomska	Minimum cijene korisne energije
Qi i sur. 2022 [64]	PV-WT-BT-DG	HOMER	Ekonomska	Minimum cijene korisne energije
Emad i sur. 2021 [58]	PV-WT-BT	GA PSO GWO WHO HOMER	Tehno- ekonomska	Dvije funkcije cilja: 1. Pouzdanost sustava, definirana preko mogućnosti zadovoljavanja potreba opterećenja 2. Minimum cijene korisne energije

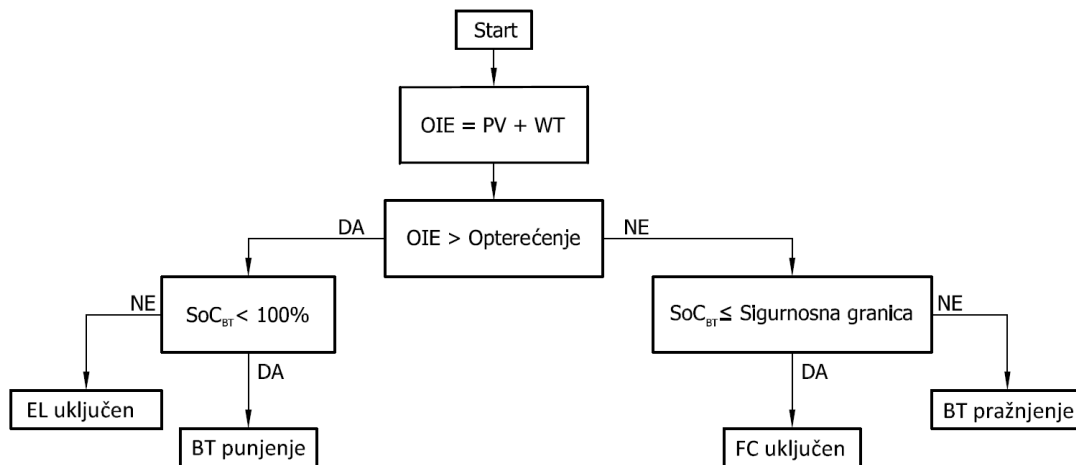
He i sur. 2022 [67]	PV-WT-BT-HS-HP	GA	Tehno- ekonomska	Dvije funkcije cilja: 1. Pouzdanost sustava, definirana preko mogućnosti zadovoljavanja potreba opterećenja 2. Minimalan neto trošak sustava
Kilic i Altun 2023 [34]	PV-WT-BT-HS	Taguchi pristup	Ekonomsko- ekološka	Dvije funkcije cilja: 1. Minimum cijene korisne energije 2. Minimum emisije CO <sub>2</sub> , definirana iz proizvodnje, dostave i održavanja sustava
Kumar i sur. 2023 [72]	PV-HP-BM-BT-EG	JAYA	Tehno-socio- ekonomska	Tri funkcije cilja: 1. Minimum cijene korisne energije 2. Minimum emisije CO <sub>2</sub> , definirana iz proizvodnje, dostave i održavanja sustava 3. Socijalni indeks definiran mogućnošću stvaranja novih radnih mjesta
Dufo-López i sur. 2016 [60]	PV-WT-BT-DG	MOEA GA	Socio- ekonomska	Tri funkcije cilja: 1. Minimalan neto trošak sustava 2. Socijalni indeks definiran mogućnošću stvaranja novih radnih mjesta 3. Socijalni indeks definiran ljudskim razvojem

### 2.3. Strategije upravljanja energijom unutar samostalnih hibridnih energetskih sustava

Kako bi se postigao pravilan rad HRES-a, koji sadrži više od jednog oblika skladištenja energije, za postizanje svih postavljenih ciljeva sustava, strategija upravljanja energijom (*engl. Energy Management Strategy*, EMS) je neophodna. Pravilno postavljena EMS za pripadajuću HRES konfiguraciju omogućava sustavu postizanja visoke razine pouzdanosti, te utječe na životni vijek sastavnih komponenti sustava. Prikladna EMS je potrebna kod svih samostalnih sustava, kako bi se uspjele zadovoljiti sve energetske potrebe opterećenja, kada proizvodni kapacitet HRES-a to nije u stanju isporučiti [25]. Glavni ciljevi postavljenih strategija mogu biti osiguravanje energetske potreba krajnjeg korisnika, ispunjavanje ekonomskih kriterija ili rješavanje problema koje nameće realni sustav, kao što je degradacija i životni vijek sastavnih komponenta sustava [84].

Strategije, kojima je jedini cilj zadovoljavanje potreba krajnjeg opterećenja, svoj algoritam uglavnom temelje na bilansi energije sustava, stanja napunjenosti baterije (*engl. Battery State*

of Charge,  $SoC_{BT}$ ) i razini skladištenog vodika u spremniku. Prednost ovakvih EMS je jednostavnos algoritama upravljanja, koji se uglavnom temelje na dijagramima toka energije. Jedna takva osnovna EMS (EMS-1), kojoj je centralana komponenta sustava baterija, te se upravljanje vrši preko  $SoC_{BT}$ , je prezentirana u [8, 21, 23, 24, 41, 47, 56], slika 2.7. Prvo se provjerava energetska razlika između proizvedene energije i potreba opterećenja. Ako je energetska razlika pozitivna, provjerava se dali je  $SoC_{BT}$  manje od 100%. Ako je  $SoC_{BT}$  manje od 100%, energija se koristi za punjenje baterije, dok u slučajevima kad je  $SoC_{BT}$  100%, energija se usmjerava u elektrolizator za proizvodnju vodika. U slučajevima kad je energetska razlika negativna,  $SoC_{BT}$  se uspoređuje s postavljenom razinom sigurnosne granice  $SoC_{BT}$ . Ako je  $SoC_{BT}$  poviše postavljene sigurnosne granice, opterećenje preuzima energiju iz baterije, a ako je  $SoC_{BT}$  niže ili jednako  $SoC_{BT}$  sigurnosne granice, uključuje se FC.



Slika 2.7: EMS-1 dijagram toka

Li i ostali [21] primjenom EMS-1 na PV/BT/HS konfiguraciji sustava, prikazuju prednosti korištenja dva tipa skladištenja energije u usporedbi s PV/BT i PV/HS konfiguracijama sustava.

Osim algoritama na osnovi dijagrama toka energije, koriste se i optimizacijski algoritmi za izražavanje energetske bilance HRES-a i postizanje cilja zadovoljavanja krajnjeg opterećenja, kao što su model prediktivne kontrole (*engl. Model Predictive Control, MPC*) [29] i fuzzy logika [85]. Međutim, nedostatak ovakvih algoritama je potreba za preciznim matematičkim modelima HRES-a i ulaznim podacima.

Strategije s tehničkim faktorom pri upravljanu, osim glavnog cilja za zadovoljavanje krajnjeg opterećenja, najčešće postavljaju ciljeve produljenja životnog vijeka sastavnih komponenata ili postizanje boljih performansi pojedinih komponenata sustava. Kao i prethodni tip strategija, ovakve strategije također najčešće postavljaju bateriju kako osnovnu komponentu sustava s

postavljenom prednošću za punjenjem i pražnjenjem u slučajevima kad postoji višak, odnosno manjak energije. Korištenje HS-a će izravno ovisiti o  $SoC_{BT}$ . Korištenje ovog tipa strategije je prezentirano u [24, 27, 32, 33, 41, 57, 81]. Neka istraživanja definiraju prioritete prema nazivnim snagama komponenata sustava, na osnovi rješenja korištenih algoritama [26, 46, 51]. Osnovna razlika ovakvih strategija i strategija samo s ciljem zadovoljavanja potreba opterećenja, je u postavljenim ograničenjima radnih točaka baterije i HS za postizanje ciljeva poboljšanja performansi i/ili produljenje životnog vijeka komponenata.

U istraživanjima [27, 32, 33, 81] se koriste petlje histereze za upravljanje ciklusa uključivanja i isključivanja FC i elektrolizatora, u svrhu produljenja životnog vijeka HS-a. Histereze su definirane  $SoC_{BT}$ . Nedostatak ovakvih strategija je fiksno postavljene vrijednosti  $SoC_{BT}$  kojima se definiraju petlje histereze.

Cano i ostali [51] se koristi predviđanjem vremenskih uvjeta i opterećenja, u svrhu određivanja potrebe korištenja HS-a, te na taj način nastoji smanjiti broj ciklusa uključivanja i isključivanja FC i elektrolizatora. Algoritam upravljanja postavljene EMS se bazira na fuzzy logici. Nedostatak strategije na osnovi predviđanja vremenskih uvjeta i opterećenja je potreba za visoko preciznim ulaznim podacima vremenske prognoze, te preciznim matematičkim modelima komponenata HRES-a.

Osim produljenja životnog vijeka HRES komponenata, kao cilj strategija s tehničkim faktorom upravljanja se također postavlja i uvjet visoke performanse sustava. Uvjet visoke performanse se uglavnom odnose na rad elektrolizatora, pa tako u [41, 57] autori koriste EMS s jednostavnim algoritam na osnovi dijagrama toka u svrhu postizanja proizvodnje vodika veće čistoće, dok [46] postavlja uvjet a postizanje što veće proizvodnje vodika.

Generalni nedostatak strategija s tehničkim ciljem (životni vijek i performanse sustava) je nedostatak ekonomskog cilja, pa se ne može postići ekonomski optimalna performansa sustava.

Strategije koje postavljaju ekonomski cilj, uz cilj zadovoljavanja krajnjeg opterećenja, uzimaju u obzir kapitalne i operativne troškove sustava. Ovaj tip strategija ima potencijalnu primjenu pri dimenzioniranju sustava, te je prednost što se korištenjem ekonomskih parametara upravljanja može postići optimalno ekonomsko rješenje rada sustava. Međutim, ekonomsko optimalno rješenje ne znači da se postižu i povoljni radni uvjeti svih komponenata sustava. Autori u [23] koriste algoritam izrađen prema dijagramu toka, dok [56] koristi predviđanje proizvedene energije i potreba opterećenja, ali se za svaku iteraciju koristi pojednostavljeni model sustava.

Posljednji tip strategije postavlja ekonomski cilj, tehnički cilj i cilj zadovoljavanja krajnjeg opterećenje. Kombinacijom svih ciljeva je moguće postići ekonomski optimalno rješenje uz dobre performanse sustava. Međutim, ovakav tip strategija zahtjeva složene algoritme upravljanja i optimizaciju rada sustava. U [25] autori koriste algoritam fuzzy logike, dok [28] koriste EMS hijerarhijske strukture za rješavanje višeciljnog problema, a ekonomski faktor odlučivanja sadrži podatke životnog ciklusa pripadajućih HRES komponenata i troškove smanjenja životnog vijeka istih.

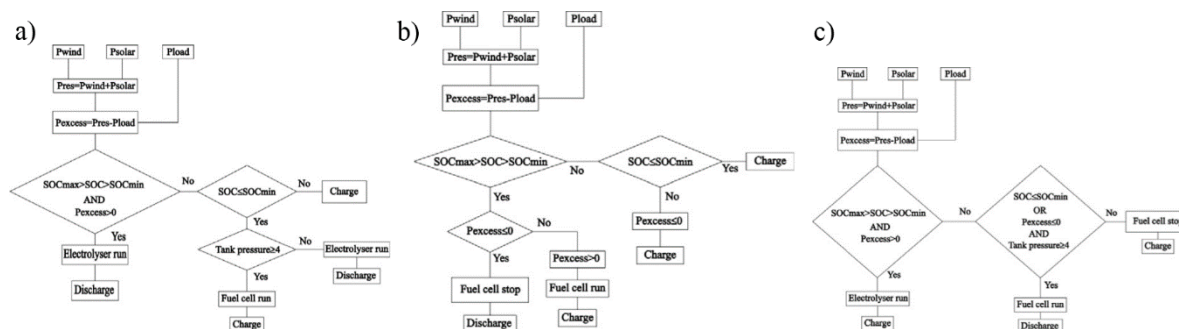
### 2.3.1. Pregled istraživanja

Tri strategije upravljanja energijom su uspoređene u [23] za PV/BT/HS konfiguraciju sustava. Strategije se zasnivaju na energetske bilanci sustava, koja se održava preko  $SoC_{BT}$  i razine vodika u spremniku. Ovisno o energetske razlici proizvedene energije i opterećenja, sustav će odlučiti o punjenju ili pražnjenju baterije i uključivanju i isključivanju elektrolizatora i FC, s postavljenim prioritetom na skladište s više pohranjene energije. Treća strategija dodatno uvodi ekonomski faktor baterije, FC i elektrolizatora, koji u slučaju izjednačenosti prethodnog uvjeta odabire element s najnižom cijenom punjenja, tj. pražnjenja unutar HRES-a. Ekonomski faktori su definirani preko kapitalnih troškova, troškova održavanja, životnog vijeka i učinkovitosti. Usporedba strategija je izvršena preko ukupne učinkovitosti HRES-a, gdje je druga strategija upravljanja energijom postigla najvišu učinkovitost.

Bahzadi i Niasati [8] prezentiraju tri različite strategije upravljanja energijom za PV/BT/HS konfiguraciju. Prva razmatrana strategija je EMS-1. Druga strategija provjerava stanje  $SoC_{BT}$  samo kad je energetska razlika proizvedene energije i opterećenja pozitivna, a u slučaju kad je energetska razlika negativna provjerava se stanje vodika u spremniku. Ako je razina vodika u spremniku poviše kritične razine, koristi se FC, a u suprotnom slučaju se koristi baterija za opskrbu opterećenja. Kod treće strategije elektrolizator i FC su postavljeni da uvijek rade pri nazivnoj snazi. U ovako postavljenoj strategiji baterija će preuzimat svaki višak električne energije proizveden od FC, te nadomjestiti svaki manjak za rad elektrolizatora pri nazivnoj snazi.

Tri različite EMS su istraživane u [46] za PV/WT/BT/HS konfiguraciju sustava, slika 2.8. Osnovna razlika među strategijama je način korištenja viškova energije, korištenje HS-a ovisi o  $SoC_{BT}$ . U prvoj EMS, elektrolizator ima prednost pred baterijom u slučajevima pozitivne energetske bilance sustava, te ako višak energije nije dovoljan za rad elektrolizatora, baterijom se potpomaže proizvodnja vodika. Cilj ovakve strategije je postići što bolju proizvodnju vodika.

Druga strategija je postavljena prema punjenju baterije i održavanju što boljeg  $SoC_{BT}$ , dok je treća EMS postavljena da balansira proizvodnju vodika i održavanje  $SoC_{BT}$ . Viškovi energije se koriste za punjenje baterije i proizvodnju vodika, a u slučaju nedostatka energije se koriste baterija i FC za nadopunu potreba opterećenja. Prioriteti korištenja baterije ili HS nisu specificirani. Rezultati su pokazali da se korištenjem treće strategije postiže najviša učinkovitost sustava, od tri predložene strategije.



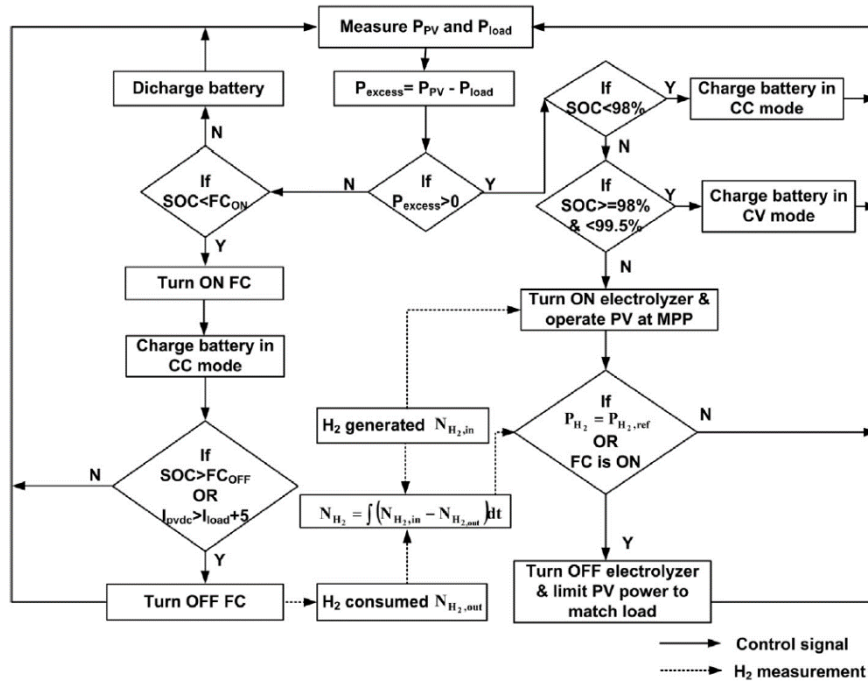
Slika 2.8: Dijagrami toka EMS: a) prva EMS; b) druga EMS; c) treća EMS [46]

Dash i Bajpai [24] predlaže EMS za PV/BT/HS konfiguraciju sustava, kojom se želi postići neprekidna opskrba krajnjeg korisnika, slika 2.9. Baterija je glavna komponenta razmatranog HRES-a, te se  $SoC_{BT}$  koristi za uključivanje i isključivanje HS-a, a intenziteti punjenja i pražnjenja baterije su kontrolirana putem MPPT (*engl. Maximum Power Point Tracking*). Pošto se MPPT kontrolira izlazna snaga svih izvora, nema potrebe za korištenjem opterećenja za neutralizaciju neiskorištenih viškova (*engl. Dump Load*). Kontrola struje se koristi za brza punjenja baterije pri niskim  $SoC_{BT}$ , a kontrola napona za zaštitu baterije pri visokim strujama punjenja. Pri velikim viškovima energije, proizvodnja energije iz PV je ograničena, dok se preostali višak energije se koristi za proizvodnju vodika. FC se koristi pri niskim razinama  $SoC_{BT}$ .

Ipsakis i ostali [41] također uspoređuju tri EMS za PV/WT/BT/HS konfiguraciju sustava. Prva razmatrana strategija je EMS-1. U drugoj strategiji baterija se koriste za napajanje elektrolizatora, ukoliko energetska višak nije dovoljan za postizanje minimalne potrebne snage za rad elektrolizatora. U slučaju negativne energetske bilance HRES-a, tok energije je jednak kao i za EMS-1. Logika treće strategije je isključivanje baterije za punjenje jednom kad se postigne 100%  $SoC_{BT}$ , kako bi se izbjeglo prepunjavanje baterije te je se na taj način zaštitilo. U tom trenutku se baterija koristi za zadovoljavanje opterećenja, a energija proizvedena iz PV/WT se koristi za proizvodnju vodika, umjesto za krajnje opterećenje. Izvršene su dvije



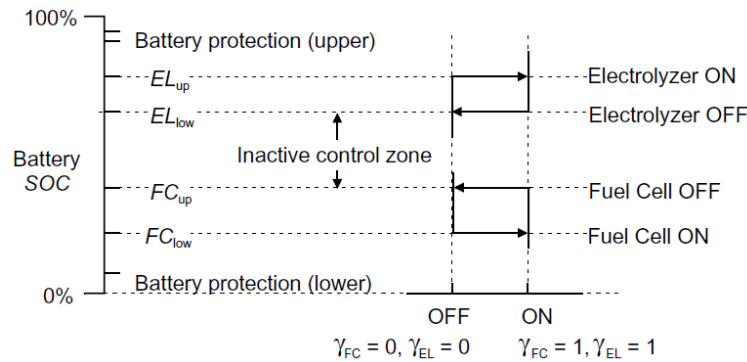
analize osjetljivosti, na osnovi postavljanja sigurnosne granice  $SoC_{BT}$  i na osnovi dva različita načina rada FC, fiksna radna točka ili varijabilna. Rezultati su pokazali da se spuštanjem sigurnosne granice  $SoC_{BT}$  poraste korištenje baterije, a opada korištenje FC. Postavljanjem varijabilnog načina rada FC, smanjuje se potrošnja vodika.



Slika 2.9: Dijagram toka EMS Dash i Bajpai [24]

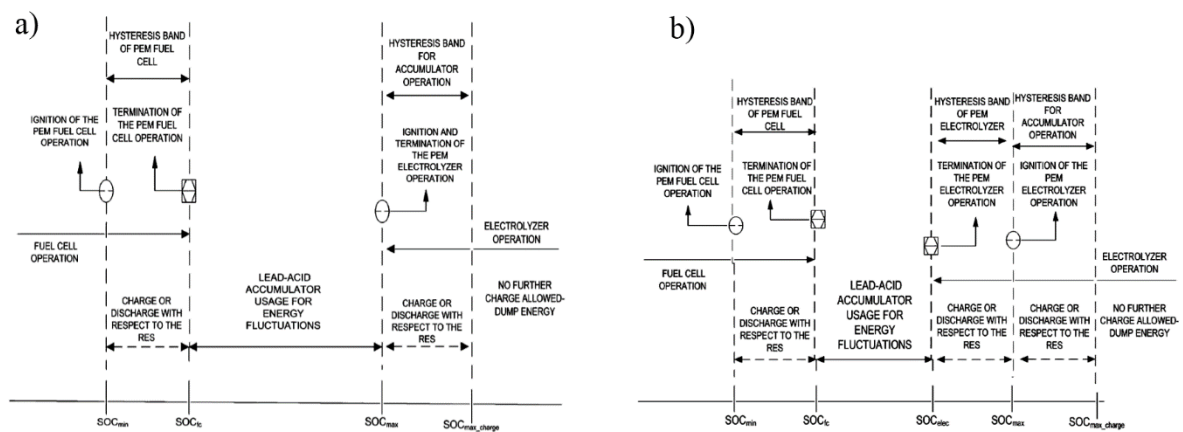
Važnost korištenja pravilne EMS za PV/BT/HS konfiguraciju sustava ističe Ulleberg [33]. U radu je prezentirana strategija koja se zasniva na  $SoC_{BT}$ , kojim se kontrolira uključivanje i isključivanje FC i elektrolizatora na principu petlji dvostrukih histereza, slika 2.10. Elektrolizator će se uključiti nakon što se postigne viša ili jednaka vrijednost  $SoC_{BT}$  za uključivanje elektrolizatora ( $EL_{up}$ ), te će ostati uključen sve dok  $SoC_{BT}$  ne bude niže ili jednako  $SoC_{BT}$  za isključivanje elektrolizatora ( $EL_{low}$ ). FC će se uključiti, ako je  $SoC_{BT}$  niže ili jednako  $SoC_{BT}$  za uključivanje FC ( $FC_{low}$ ), te će ostati uključen sve dok se ne postigne vrijednost  $SoC_{BT}$  viša ili jednaka za isključivanje FC ( $FC_{up}$ ). Izvršena je usporedba performansi sustava za postavljenu fiksnu i varijabilnu radnu točku elektrolizatora. Rezultati su pokazali da je varijabilni način rada elektrolizatora bolji, u usporedbi s radom u fiksnoj točki.

Zhou i ostali [32] također istražuju EMS dvostrukih histereza za PV/BT/HS konfiguraciju sustava. Analizom su razmatrane dvije lokacije različitih podneblja: Innsbruck, Austrija; Singapur. Elektrolizator je postavljen na varijabilan način rada, a FC u fiksnoj točki. Rezultati su pokazali stabilan rad sustava bez prekida za obje razmatrane lokacije.



Slika 2.10: Dijagram upravljanja petlji dvostrukih histereza [33]

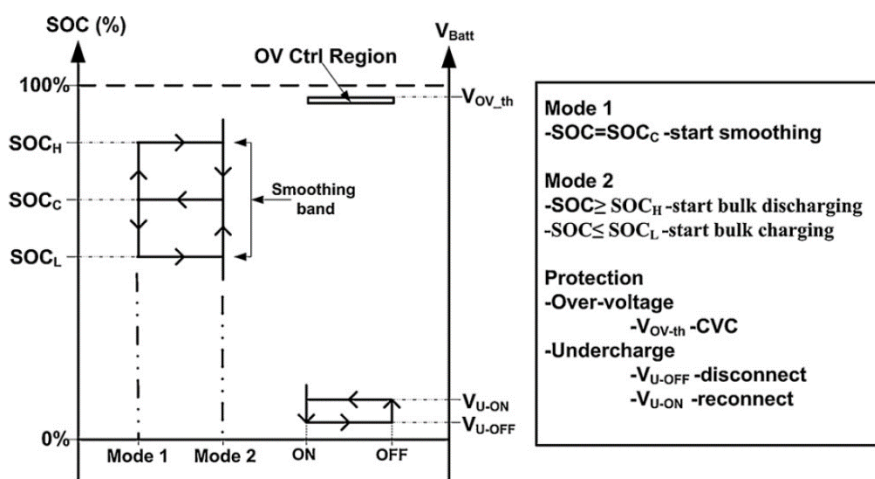
Ipsakis i ostali [57] uspoređuju dvije EMS s petljama histereze, za PV/WT/BT/HS konfiguraciju sustava, slika 2.11. Prva strategija se koristi logikom histereze za upravljanje uključivanja i isključivanja FC, dok se režim uključivanja i isključivanja elektrolizatora ovisi o  $SoC_{BT}$  i dostupnosti obnovljivih izvora energije. Elektrolizator će biti uključen u slučajevima kad  $SoC_{BT}$  dosegne gornju granicu i kad je energetska višak povoljan za siguran rad elektrolizatora. Strategija dva je postavljena s logikom upravljanja dvostruke histereze, kao i kod [32, 33]. Rezultati su pokazali da se korištenjem druge EMS postiže bolja proizvodnja vodika, uz više korištenje baterije. Veći raspon  $SoC_{BT}$  histereza za uključivanje i isključivanje elektrolizatora i FC se pokazalo pogodnije za rad sustava.



Slika 2.11: Dijagram upravljanja petlji histereza: a) prva EMS; b) druga EMS [57]

Upravljanjem uključivanja i isključivanja elektrolizatora i FC preko petlje histereze, autori u [27] žele održavati  $SoC_{BT}$  na određenoj razini, slika 2.12. Predložena EMS je primijenjena za PV/BT/HS konfiguraciju sustava. Dok se  $SoC_{BT}$  nalazi u željenom rasponu, snaga opterećenja se koristi referenca za upravljanje toka energije od/do FC i elektrolizatora. Takvo upravljanje toka energijom omogućuje FC i EL rad po glatkim krivuljama snage, pa je stoga ovaj režim rada HRES-a nazvan zaglađivanje. Drugi režim rada se koristi za brzo postizanje željene

vrijednosti  $SoC_{BT}$ , putem brzog punjenja ili pražnjenja, ovisno o tome je li se  $SoC_{BT}$  nalazi ispod  $SoC_{BT}$  za uključivanje FC, odnosno SoC za uključivanje elektrolizatora. U slučajevima prepunjivanja ili prekomjernog pražnjenja baterije, postavljene su sigurnosne petlje za očuvanje baterije. Rezultati su pokazali da se ovom EMS postiže stabilniji i mirniji rad FC i elektrolizatora.



Slika 2.12: Dijagram upravljanja i odabir režima rada [27]

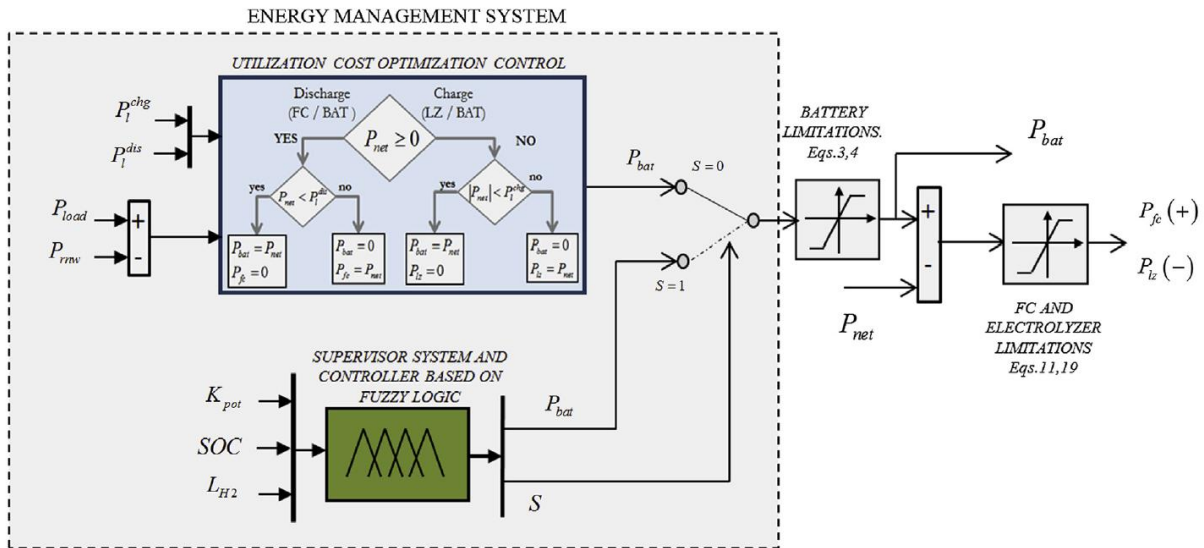
Torreglosa i ostali [29] uspoređuju EMS dvostrukih histereza  $SoC_{BT}$  i spremnika vodika s EMS koja se zasniva na MPC. Istraživanje je izvršeno za PV/WT/BT/HS konfiguraciju sustava. Prva strategija određuje tok energije unutar sustava prema postavljenim uvjetima upravljanja rada FC i elektrolizatora, te punjenja i pražnjenja baterije. Kontroliranim radom HS i baterije se održava željena razina vodika u spremniku i  $SoC_{BT}$ . Druga strategija koristi MPC za određivanje radne točke svake HRES komponente, a ulazni podaci prema kojima se to određuje proizlaze iz upravljanja dvostrukih histereza za spremnik vodika i  $SoC_{BT}$ . MPC osigurava da su ispunjeni uvjeti praćenja krajnjeg opterećenja, te održavanje razine vodika i  $SoC_{BT}$  na željenoj razini. Rezultati su pokazali da se korištenjem MPC postiže bolja učinkovitost HRES-a.

Rullo i sur. [68] za PV/WT/BT/HS konfiguraciju sustava predlažu EMS baziranu na MPC logici upravljanja. Logika upravljanja predložene strategije se vrši prema tehno-ekonomskoj funkciji cilja: zadovoljavanje potreba krajnjeg korisnika; ekonomski najisplativija performansa sustava. Rezultati su pokazali mogućnost smanjenja kapitalnog i operativnog troška sustava pri korištenju predložene EMS, što je postignuto optimalnom raspodjelom energije tokom rada sustava.

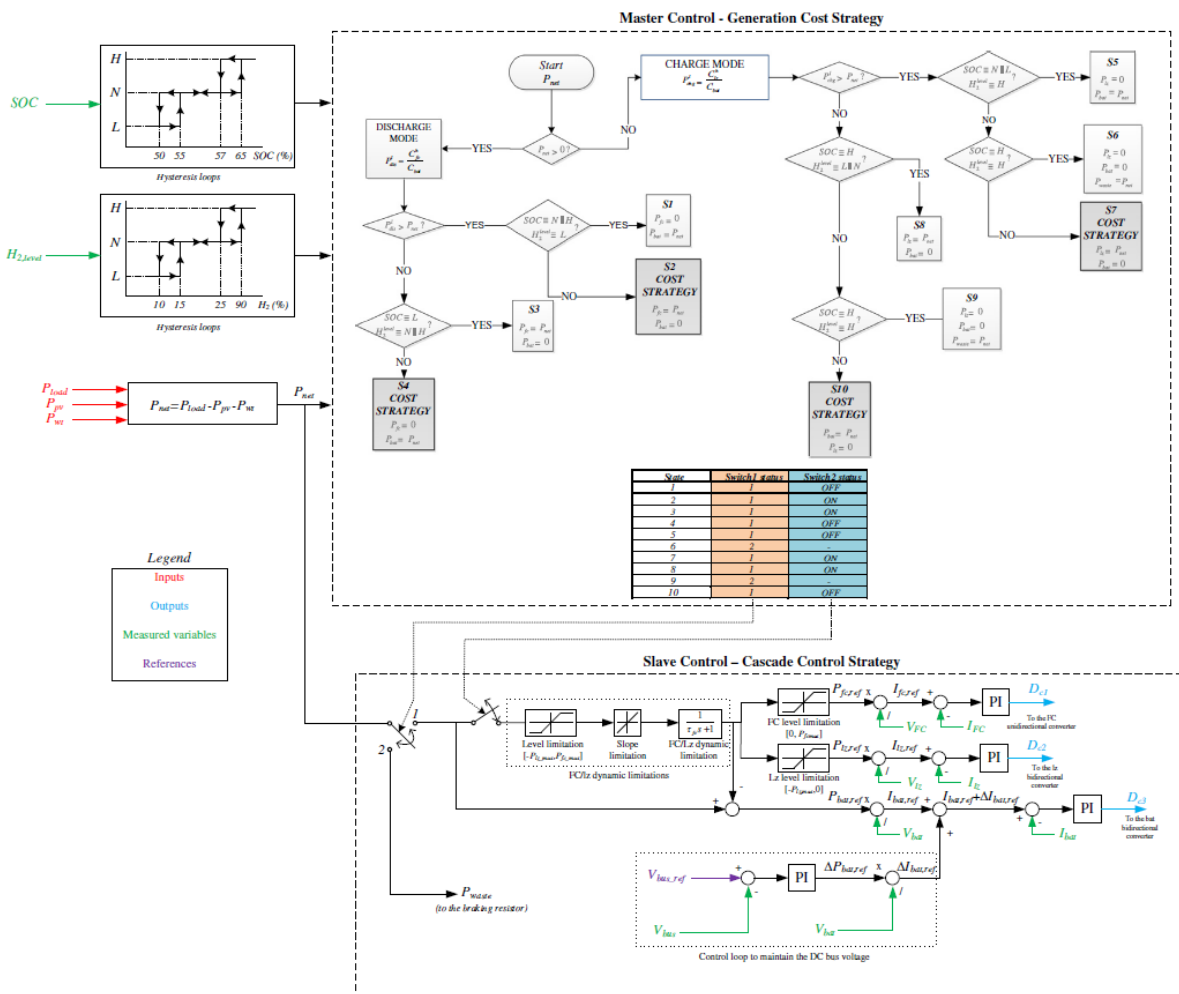
Cano i ostali [51] postavljaju EMS na osnovu predviđanja proizvodnje energije i opterećenja i fuzzy logike za PV/WT/BT/HS konfiguraciju sustava. Upravljanje ciklusa uključivanja i isključivanja elektrolizatora i FC se donosi u ovisnosti  $SoC_{BT}$  i prognozi proizvedene energije, dok se fuzzy logikom određuje radna točka svake od pripadajućih komponenata. Dobiveni rezultati simulacije su uspoređeni s rezultatima [56], gdje autori također koriste fuzzy logiku upravljanja uz predviđanje proizvedene energije i opterećenja. Rezultati usporedbe su pokazali da su [51] postigli manji broj uključivanja elektrolizatora nego [56], ali uz veći broj radnih sati.

Osnovna EMS-1 je uspoređena s strategijom koja se zasniva na algoritmu fuzzy logike u [25], slika 2.13. Istraživanje je izvršeno za PV/WT/BT/HS konfiguraciju sustava. Fuzzy logika je odgovorna za određivanje koja će komponenta biti korištena za primanje ili davanje energije, te pri kojoj snazi. Ekonomski faktori troška korištenja energije, koeficijenti snage,  $SoC_{BT}$ , stanje vodika u spremniku, te trenutno stanje životnog vijeka su parametri na osnovu kojih se donose odluke upravljanja energijom. Rezultati istraživanja su pokazali da se korištenjem strategije s fuzzy logikom postiže sveukupno manji trošak korištenja HRES-a, te je potreban manji broj izmjena baterije, elektrolizatora i FC. Istraživanje, za istu konfiguraciju sustava, je nastavljeno u [26], gdje su prezentirane dvije nove fuzzy logike za nadgledanje upravljanja energetskeg toka. Prva EMS je postavljena tako da sustav pokušava skladištiti što je više moguće energije, te smanjiti neiskorištene energetske viškove. Druga EMS je postavljena tako da osigura minimalan potreban broj izmjena baterije, elektrolizatora i FC. Korišteni su jednaki parametri za donošenje odluka za upravljanje energijom, osim ekonomskog faktora koji za ove dvije strategije nije bio korišten. Rezultati su pokazali da se korištenjem EMS [25] postižu najbolji rezultati rada sustava, uspoređenje tri strategije na osnovu fuzzy logike.

Torreglosa i ostali [28] istražuju EMS hijerarhijske strukture za PV/WT/BT/HS konfiguraciju sustava, slika 2.14. Strategija je postavljena tako da glavni algoritam upravljanja (*engl. Master Control*) donosi odluke raspodijeli energije, a pomoćni algoritam upravljanja (*engl. Slave Control*) usvaja i prilagođava raspodjelu energije dinamičkim ograničenjima. Glavni algoritam upravljanja prati logiku dijagrama toka na osnovi  $SoC_{BT}$  i stanja vodika u spremniku. Pomoćni algoritam upravljanja koristi kaskadne upravljačke petlje za upravljanje izvora energije, slijedeći odluke glavnog algoritma upravljanja. Ciklusi punjenja i pražnjenja skladišnih kapaciteta će ovisiti o razini skladištene energije. U slučaju jednakosti, odluka se donosi prema tehničkom i ekonomskom faktoru, koji obuhvaćaju funkcije troškova u ovisnosti o životnom vijeku komponenata. Rezultati su pokazali da se korištenjem ove EMS postiže pouzdan rad HRES-a.



Slika 2.13: Shema logike upravljanja korištenjem fuzzy logike [25]



Slika 2.14: EMS hijerarhijske strukture upravljanja [28]

Kamel i sur. [86] postavljaju hijerarhijsku EMS za PV/WT/BT/FC konfiguraciju sustava prema dvije tehničke funkcije cilja: zadovoljavanje potreba opterećenja; postizanje visokih radnih performansi sustava. Logika upravljanja predložene hijerarhijske strategije je postavljena povezivanjem fuzzy logike, strategije odvajanje frekvencija i SMCS (*engl. State Machine Control Strategy*). Prelazak upravljanja sustava s jedne logike na drugu je regulirano vrijednostima trenutne potrošnje vodika i  $SoC_{BT}$ . Postavljena hijerarhijska EMS je uspoređena sa svakom navedenom logikom pojedinačno, gdje su rezultati pokazali bolje radne performanse baterije i smanjenje potrošnje vodika.

Tablica 2.4 pruža sažeti pregled korištenih EMS i funkcija cilja prema kojima su postavljene logike upravljanja.

*Tablica 2.4: Pregled korištenih strategija upravljanja energijom*

Literatura	Konfiguracija sustava	Strategija upravljanja energijom	Funkcija cilja
Ulleberg 2004 [33]	PV-BT-HS	Logika upravljanja petljama histereze	Tehnička Dvije funkcije cilja: 1. Zadovoljavanje potreba opterećenja krajnjeg korisnika 2. Produljenje životnog vijeka komponenata
Zhou i sur. 2008 [32]	PV-BT-HS	Logika upravljanja petljama histereze	Tehnička Dvije funkcije cilja: 1. Zadovoljavanje potreba opterećenja krajnjeg korisnika 2. Produljenje životnog vijeka komponenata
Ipsakis i sur. 2008 [57]	PV-WT-BT-HS	Logika upravljanja prema dijagramu toka	Tehnička Dvije funkcije cilja: 1. Zadovoljavanje potreba opterećenja krajnjeg korisnika 2. Postizanje visokih radnih performansi sustava
Li i sur. 2009 [21]	PV-BT-HS	Balansiranje energije unutar sustava, EMS-1	Tehnička Zadovoljavanje potreba opterećenja krajnjeg korisnika
Stewart i sur. 2009 [85]	PV-BT-HS-EG	Fuzzy logika	Tehnička Zadovoljavanje potreba opterećenja krajnjeg korisnika
Ipsakis i sur. 2009 [41]	PV-WT-BT-HS	Balansiranje energije unutar sustava, EMS-1	Tehnička Zadovoljavanje potreba opterećenja krajnjeg korisnika
		Logika upravljanja prema dijagramu toka	Tehnička Dvije funkcije cilja: 1. Zadovoljavanje potreba opterećenja krajnjeg korisnika 2. Postizanje visokih radnih performansi sustava
Tesfahunegn i sur. 2011 [27]	PV-BT-HS	Logika upravljanja petljama histereze	Tehnička Dvije funkcije cilja: 1. Zadovoljavanje potreba opterećenja krajnjeg korisnika 2. Produljenje životnog vijeka komponenata

Carapellucci i Giordano 2012 [81]	PV-WT-HP -BT-HS	Logika upravljanja petljama histereze	Tehnička	Dvije funkcije cilja: 1. Zadovoljavanje potreba opterećenja krajnjeg korisnika 2. Produljenje životnog vijeka komponenata
Dursun i Kilic 2012 [46]	PV-WT-BT-HS	Logika upravljanja prema dijagramu toka	Tehnička	Dvije funkcije cilja: 1. Zadovoljavanje potreba opterećenja krajnjeg korisnika 2. Prioritizacija proizvodnje vodika
Castañeda i sur. 2013 [23]	PV-BT-HS	Balansiranje energije unutar sustava, EMS-1	Tehnička	Zadovoljavanje potreba opterećenja krajnjeg korisnika
		Logika upravljanja prema dijagramu toka	Tehno-ekonomska	Dvije funkcije cilja: 1. Zadovoljavanje potreba opterećenja krajnjeg korisnika 2. Ekonomski najisplativija performansa sustava
García i sur. 2013 [25]	PV-WT-BT-HS	Fuzzy logika	Tehno-ekonomska	Tri funkcije cilja: 1. Zadovoljavanje potreba opterećenja krajnjeg korisnika 2. Produljenje životnog vijeka komponenata 3. Ekonomski najisplativija performansa sustava
García i sur. 2014 [26]	PV-WT-BT-HS	Fuzzy logika	Tehnička	Dvije funkcije cilja: 1. Zadovoljavanje potreba opterećenja krajnjeg korisnika 2. Postizanje visokih radnih performansi sustava
		Fuzzy logika	Tehnička	Dvije funkcije cilja: 1. Zadovoljavanje potreba opterećenja krajnjeg korisnika 2. Produljenje životnog vijeka komponenata
Behzadi i Niasati 2014 [8]	PV-BT-HS	Balansiranje energije unutar sustava, EMS-1	Tehnička	Zadovoljavanje potreba opterećenja krajnjeg korisnika
Cau i sur. 2014 [56]	PV-WT-BT-HS	Balansiranje energije unutar sustava, EMS-1	Tehnička	Zadovoljavanje potreba opterećenja krajnjeg korisnika
		Logika prediktivnog upravljanja	Tehno-ekonomska	Dvije funkcije cilja: 1. Zadovoljavanje potreba opterećenja krajnjeg korisnika 2. Ekonomski najisplativija performansa sustava
Torreglosa i sur. 2014 [28]	PV-WT-BT-HS	Logika upravljanja na bazi hijerarhijske strukture	Tehno-ekonomska	Tri funkcije cilja: 1. Zadovoljavanje potreba opterećenja krajnjeg korisnika 2. Produljenje životnog vijeka komponenata 3. Ekonomski najisplativija performansa sustava
Torreglosa i sur. 2015 [29]	PV-WT-BT-HS	Logika prediktivnog upravljanja	Tehnička	Zadovoljavanje potreba opterećenja krajnjeg korisnika

Torreglosa i sur. 2016 [59]	PV-WT-BT-HS	Logika upravljanja prema dijagramu toka	Tehno- ekonomska	Tri funkcije cilja: 1. Zadovoljavanje potreba oterećenja krajnjeg korisnika 2. Produljenje životnog vijeka komponenata 3. Ekonomski najisplativija performansa sustava
		Logika upravljanja petljama histereze	Tehnička	Dvije funkcije cilja: 1. Zadovoljavanje potreba oterećenja krajnjeg korisnika 2. Produljenje životnog vijeka komponenata
Cano i sur. 2015 [51]	PV-WT-BT-HS	Fuzzy logika	Tehnička	Dvije funkcije cilja: 1. Zadovoljavanje potreba oterećenja krajnjeg korisnika 2. Produljenje životnog vijeka komponenata
Dash i Bajpai 2015 [24]	PV-BT-HS	Balansiranje energije unutar sustava, EMS-1	Tehnička	Zadovoljavanje potreba oterećenja krajnjeg korisnika
Rullo i sur. 2019 [68]	PV-WT-BT-HS	Logika prediktivnog upravljanja	Tehno- ekonomska	Dvije funkcije cilja: 1. Zadovoljavanje potreba oterećenja krajnjeg korisnika 2. Ekonomski najisplativija performansa sustava
Kamel i sur. 2021 [86]	PV-WT-BT-FC	Logika upravljanja na bazi hijerarhijske strukture	Tehnička	Dvije funkcije cilja: 1. Zadovoljavanje potreba oterećenja krajnjeg korisnika 2. Postizanje visokih radnih performansi sustava
Morocco i sur. 2021 [47]	PV-BT-HS	Balansiranje energije unutar sustava, EMS-1	Tehnička	Zadovoljavanje potreba oterećenja krajnjeg korisnika
Morocco i sur. 2022 [69]	PV-WT-BT-HS-DG	Balansiranje energije unutar sustava, EMS-1	Tehnička	Zadovoljavanje potreba oterećenja krajnjeg korisnika
Mahesh i sur. 2022 [71]	PV-WT-BT-EV	Balansiranje energije unutar sustava	Tehnička	Zadovoljavanje potreba oterećenja krajnjeg korisnika
Zhang i sur. 2022 [62]	PV-WT-HS	Balansiranje energije unutar sustava	Tehnička	Zadovoljavanje potreba oterećenja krajnjeg korisnika
He i sur. 2022 [67]	PV-WT-BT-HS-HP	Balansiranje energije unutar sustava	Tehnička	Zadovoljavanje potreba oterećenja krajnjeg korisnika
Kumar i sur. 2023 [72]	PV-HP-BM-BT-EG	Balansiranje energije unutar sustava	Tehnička	Zadovoljavanje potreba oterećenja krajnjeg korisnika

## 2.4. Zaključak

Pregledom literature je zaključeno da dosadašnja istraživanja još uvijek u potpunosti ne obuhvaćaju sve aspekte koji bi odgovarali realnom HRES. Većina istraživanja na temu HRES-a su usmjerena na problem dimenzioniranja sustava, postizanja boljih performansi kroz razne strategije upravljanja energijom i tehno-ekonomske analize sustava [73, 76, 84]. Međutim, mnoga od dostupnih istraživanja navode produljenje životnog vijeka ili usporavanje

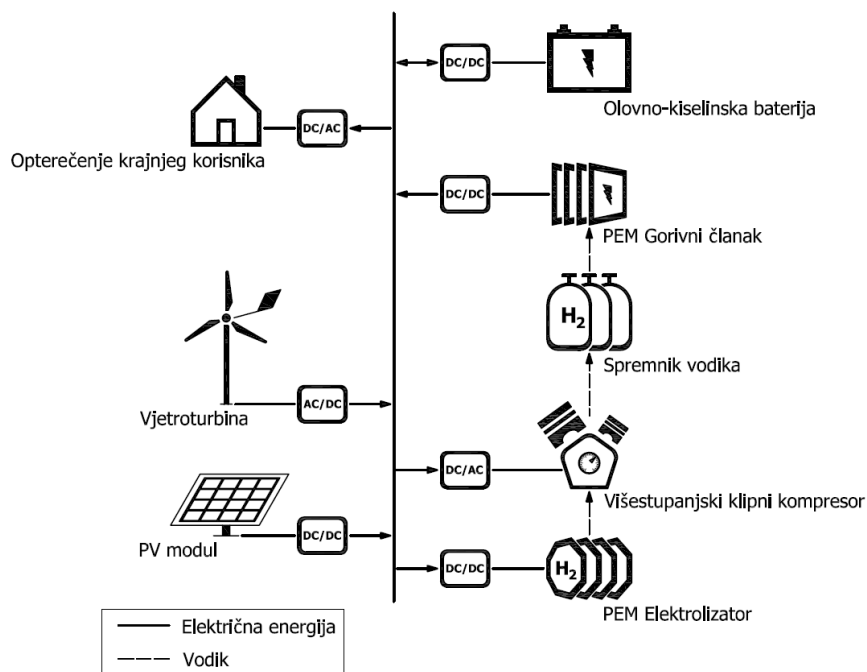


procesa degradacije komponenata kao jedan od ili jedini cilj optimizacije ili strategije upravljanja energijom, ali tek nekolicina, osim postavljanja ograničenja dubine pražnjenja baterije ili ograničenja raspona radne točke snage elektrolizatora i FC, u radu spominje ili koristi neki od modela procesa degradacije pripadajućih elemenata. Preostali životni vijek komponenti sustava je tada najčešće predodređen brojem godina, procijenjen prema broju ciklusa punjenja i pražnjenja baterije, broju radnih sati i broju ciklusa uključivanja i isključivanja FC-a i elektrolizatora. Isto tako se ne provodi analiza utjecaja gubitka kapaciteta komponenti na rad i pouzdanost sustava, a simulacije su često izvršavane na kratak vremenski period da bi se mogla izvršiti adekvatna analiza. Nadalje, često se koriste komercijalni programski alati s kojima nije moguće izvršiti takav oblik analize, koji također ne dopuštaju korisniku da sam unese izmjene koje bi mu omogućile provođenje takvog oblika analize.

### 3. MODELIRANJE KOMPONENTI SAMOSTALNOG HIBRIDNOG ENERGETSKOG SUSTAVA

U ovom poglavlju je predstavljena razmatrana HRES konfiguracija, te su detaljno opisani svi matematički modeli radnih karakteristika komponenata sustava, te metode i modeli određivanja gubitka kapaciteta i kraja životnog vijeka pojedinih komponenata. Nadalje, objašnjeni su svi razmatrani profili opterećenja krajnjeg korisnika i ulazni podaci o vremenskim uvjetima za razmatranu lokaciju.

Razmatrani HRES, slika 3.1, se sastoji od PV modula i vjetroturbine za proizvodnju električne energije iz energije Sunca, odnosno energije vjetra, olovno-kiselinske baterije za kratkoročno skladištenje energije i vodikovog podsustava za dugoročno, ili sezonsko, skladištenje energije. Razmatrani vodikov podsustav se sastoji od PEM elektrolizatora za proizvodnju vodika, višestupanjskog kompresora i spremnika za visokotlačno skladištenje vodika i PEM FC-a za korištenje vodika kad se za to pokaže potreba.



Slika 3.1: Shematski prikaz razmatranog HRES-a

Kombinacijom proizvodnje energije unutar HRES-a iz energije Sunca i energije vjetra se ublažava efekt promjenjive i isprekidane prirode istih [87], što može izravno utjecati na smanjenje potreba ukupnog kapaciteta za skladištenje energije, pouzdanost i energetska

učinkovitost sustava [20]. Nadalje, istovremeno korištenje energije Sunca i energije vjetra unutar sustava je ekonomski isplativije u usporedbi s HRES koji koriste samo jedan oblik izvora energije [20].

Olovno-kiselinske baterije su tradicionalno najčešće korišteni oblik skladištenja energije unutar HRES-a. Neki od osnovnih razloga za korištenje olovno-kiselinskih baterija su visoka ukupna učinkovitost punjenja i pražnjenja, jednostavnost korištenja i relativno niska razina održavanja [9]. Međutim, pošto životni vijek olovno-kiselinskih baterija izravno ovisi o broju ciklusa punjenja i pražnjenja i dubini pražnjenja, olovno-kiselinske baterije su ujedno i najslabija komponenta svakog HRES-a u kojem se nalaze [88–90]. Neki od najčešćih mehanizama degradacije olovno-kiselinskih baterija su rast sulfatnih kristala, kiselinska stratifikacija i gubitak aktivne mase, uzrokovano dubokim pražnjenjem, nepotpunim ciklusima punjenja, vremenom provedenim na niskim vrijednostima  $SoC_{BT}$  i prekomjernim punjenjem [88–90]. Svi ovi mehanizmi degradacije uzrokuju gubitak kapaciteta tijekom životnog vijeka baterije i preuranjeni kraj životnog vijeka. Kako bi se zaštitila baterija i izbjegle velike dubine pražnjenja baterije, sigurnosna granica  $SoC_{BT}$  je postavljena na 20% vrijednosti nazivnog kapaciteta baterije. Ukupna učinkovitost baterije je procijenjena na 90% [91].

PEM elektrolizatori i PEM FC imaju dobar odziv na promjenjiva opterećenja, što ih čini prikladnima za korištenje u sprezi s OIE [18, 19, 92]. PEM FC posjeduje dobre performanse prilikom ciklusa uključivanja i isključivanja, te je u stanju isporučiti uvjete brzine odziva do milisekunde sve dok je osiguran neometan dovod reaktanata (vodika i kisika) [18]. S druge strane, PEM elektrolizator, u odnosu na druge tehnologije elektrolizatora, ima mogućnost rada u širokom rasponu ulazne snage, što mu je omogućeno niskom brzinom prijelaza plina PEM-a, što je uzrokovano brzom reakcijom transporta protona kroz membranu promjenom snage [92].

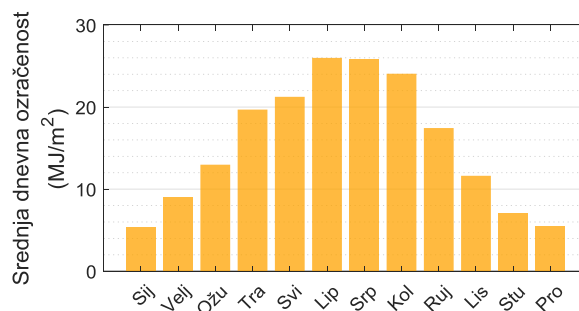
Najjednostavniji način skladištenja vodika unutar HRES-a je u obliku stlačenog plina. Komprimiranje vodika je moguće izvršiti elektrolizatorom ili kompresorom. Kako bi se izbjegli visoki radni tlakovi elektrolizatora, te tako izbjegli nepovoljni radni uvjeti elektrolizatora, i postigla bolja gustoća skladištenja vodika, koristi se višestupanjski kompresor. Nazivni tlak skladištenja vodika je postavljen na 200 bar. Kao spremnik vodika su razmatrane standardne 50-litarske industrijske čelične plinske boce. Standardne 50-litarske industrijske čelične plinske boce su održiva opcija za skladištenje vodika unutar HRES-a, jer pružaju dugo i stabilno vrijeme skladištenja vodika bez problema samopražnjenja (*engl. self-depleting*). Spremnik vodika će se smatrati ispražnjenim jednom kad tlak skladištenja padne na vrijednost tlaka od

2.5 bar. Tlak praznog spremnika je definiran rubnim uvjetom donje granice tlaka pri kojem FC može raditi.

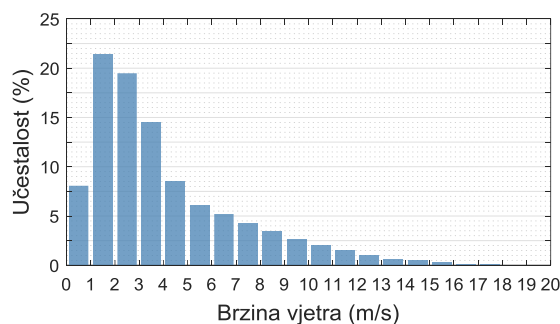
Svaka sastavna komponenta, osim skladišta vodika, ima svoj pripadajući naponski pretvarač preko kojeg je povezan na DC sabirnicu od 24 V. Učinkovitost svih DC/DC naponskih pretvarača iznosi 95%, a AC/DC i DC/AC naponskih pretvarača 90%.

### 3.1. Ulazni podaci o vremenskim uvjetima

Dostupnost solarne energije i energije vjetra je isprekidana i nepredvidljiva, te izravno ovisi o geografskom položaju i prirodnim karakteristikama pojedine lokacije. Sunca je dostupno samo tokom dana, a na nepredvidljivost dostupnosti solarne energije značajno utječu oblačno i kišovito vrijeme. U usporedbi sa solarnom energijom, isprekidanost i nepredvidljivost energije vjetra je još više izražena, jer iako je moguće predvidjeti da će vjetra puhati i gdje, nije moguće točno predvidjeti brzinu vjetra i trenutak kada će vjetar puhati. Satni podaci brzine vjetra i Sunčevog zračenja za vremenski period od 20 godina su dobiveni od strane Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ) za lokaciju Split, Hrvatska. Mjerene vrijednosti brzine vjetra se odnose za visinu mjerenja od 10 m, a vrijednosti Sunčevog zračenja se odnosi za horizontalnu površinu. Slika 3.2 prikazuje godišnju distribuciju srednje dnevne ozračenosti horizontalne plohe, a slika 3.3 prikazuje histogram brzine vjetra.



Slika 3.2: Srednja dnevna ozračenost horizontalne plohe, lokacija Split, Hrvatska



Slika 3.3: Histogram brzine vjetra za visinu mjerenja od 10 metara, lokacija Split, Hrvatska

### 3.1.1. Solarna energija

Zemlja oko Sunca kruži po eliptičnoj putanji frekvencijom od jednog punog okretaja godišnje, stvarajući ekliptičnu ravninu. Zemlja se također rotira oko svoje vlastite osi, te svojom ekvatorijalnom ravninom siječe ekliptičnu ravninu pod kutom od  $23.45^\circ$ , a kut između spojnice središta Sunca i središta zemlje se naziva deklinacija Sunca [93, 94]. Deklinacija Sunca ( $\delta$ ) je definirana kao:

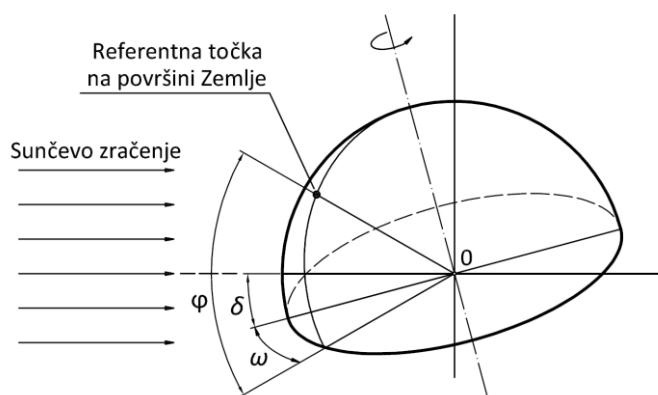
$$\delta = 23.45^\circ \cdot \sin \left[ \left( \frac{284 + n_{dan}}{365} \right) 360^\circ \right] \quad (3.1)$$

gdje je  $n_{dan}$  redni broj dana u godini. Kako bi se jednostavnije opisalo Sunčevo zračenje za određenu lokaciju, na Zemlji se postavlja nepomični koordinatni sustav i uvodi se prividno Sunčevo gibanje oko Zemlje [93, 94]. Položaj Sunca u odnosu na Zemlju je definiran Sunčevim vremenom ( $t_s$ ), visinom Sunca ( $\alpha_s$ ) i već spomenutom deklinacijom. Sunčevo vrijeme je definirano kao:

$$t_s = t_{lok} - 4(\lambda_{st} - \lambda_{lok}) + \Delta t_v \quad (3.2)$$

gdje je  $t_{lok}$  zemaljsko mjesno vrijeme za određenu lokaciju,  $\lambda_{st}$  je zemljopisna duljina referentnog meridijana (za srednjeeuropsko vrijeme  $15^\circ$ ),  $\lambda_{lok}$  zemljopisna duljina razmatrane lokacije, a  $\Delta t_v$  je korekcijski faktor. Iz Sunčevog vremena je moguće odrediti satni kut Sunca ( $\omega$ ). Satni kut sunca je projekcija na ekvatorijalnu ravninu između spojnice Sunce-Zemlja i projekcije spojnice između središta zemlje i promatrane lokacije definirane zemljopisnom širinom ( $\varphi$ ) na ekvatorijalnu ravninu, slika 3.4. Satni kut sunca je definiran kao:

$$\omega = (12 \text{ h} - t_s) 15^\circ \quad (3.3)$$



Slika 3.4: Položaj Sunca na Zemlji opisan kutom zemljopisne širine, satnim kutom Sunca i deklinacijom Sunca

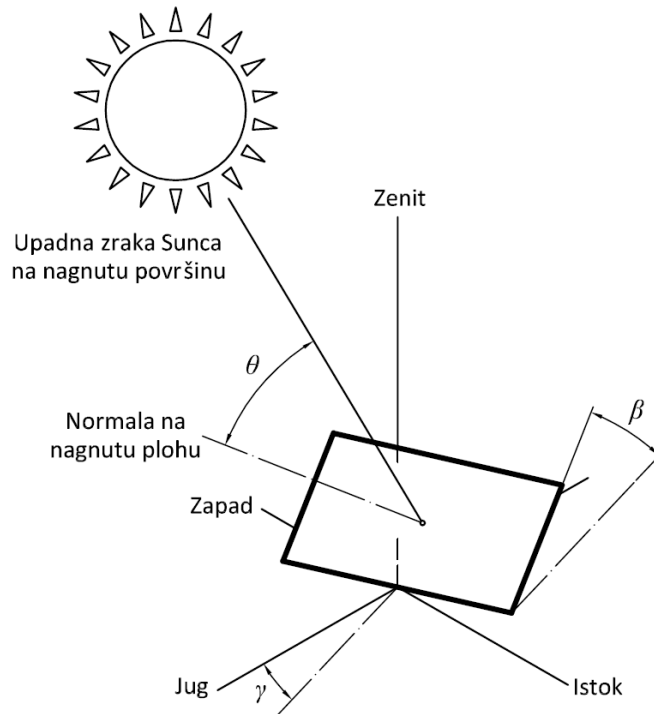
Visina sunca je kut pod kojim Sunčeva zraka upada na horizontalnu plohu.

$$\sin \alpha_s = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (3.4)$$

Kako bi se mogao odrediti profil proizvedene energije i izvršiti pravilno dimenzioniranje solarnog sustava, potrebno je poznavati profil Sunčevog zračenja na nagnutu plohu [93]. Kut upada Sunčeve zrake na nagnutu plohu je definiran kao kut između upadne zrake sunca na nagnutu plohu i normale na nagnutu plohu ( $\theta$ ):

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \varphi \cos \beta \\ & - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma \\ & + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (3.5)$$

gdje je  $\beta$  kut nagnute plohe, a  $\gamma$  je azimut nagnute plohe. Azimut nagnute plohe je kut između projekcije normale nagnute plohe na horizontalnu ravninu i pravca sjever-jug. Slika 3.5 prikazuje odnos kutova Sunčevog zračenja na nagnutu plohu.



Slika 3.5: Sunčevo zračenje na nagnutu plohu

Ukupno Sunčevo zračenje na horizontalnu plohu ( $E_g$ ) je definirano kao:

$$E_g = E_b + E_d \quad (3.6)$$

gdje je  $E_b$  udio izravnog Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu, a  $E_d$  je udio raspršenog Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu. Ukupno Sunčevo zračenje na nagnutu plohu se sastoji od tri komponente: izravnog Sunčevog zračenja na nagnutu plohu ( $E_{b,\beta}$ ); raspršenog Sunčevog zračenja na nagnutu plohu ( $E_{d,\beta}$ ); reflektirajućeg Sunčevog zračenja od okoline koje dopire do nagnute plohe ( $E_{r,\beta}$ ). Iz mjerenih satnih podataka o globalnom Sunčevom zračenju na horizontalnu plohu moguće je odrediti ukupno Sunčevo zračenje na nagnutu plohu ( $E_\beta$ ) korištenjem Liu-Jordan-Klein metode [93, 94]:

$$E_\beta(t) = E_{b,\beta}(t) + E_{d,\beta}(t) + E_{r,\beta}(t) \quad (3.7)$$

Izravno Sunčevo zračenje na nagnutu plohu je definirano kao:

$$E_{b,\beta} = E_b \frac{\cos \theta}{\sin \alpha_s} = E_b R_b \quad (3.8)$$

gdje je  $R_b$  omjer izravnog Sunčevog zračenja na južno orijentiranu plohu nagnute prema horizontali i izravnog zračenja na horizontalnu plohu. Prema izrazima (3.6) i (3.8), udio izravnog Sunčevog zračenja na nagnutu plohu se također može definirati kao:

$$E_{b,\beta} = \left(1 - \frac{E_d}{E_g}\right) R_b E_g \quad (3.9)$$

gdje se omjer raspršenog Sunčevog zračenja i ukupnog Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu može definirati kao koeficijent udjela raspršenog Sunčevog zračenja u ukupnom Sunčevom zračenju ( $K_d$ ). Udio raspršenog Sunčevog zračenja u ukupnom je za geografsko područje kojem pripada Hrvatska definiran kao:

$$K_d = 1.6 - 4.17K_T + 5.29K_T^2 - 2.86K_T^3 \quad (3.10)$$

gdje je  $K_T$  indeks prozračnosti, definiran kao omjer globalnog Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu i ekstraterestičkog zračenja na horizontalnu plohu ( $E_{oh}$ ).

$$K_T = \frac{E_g}{E_{oh}} \quad (3.11)$$

Ekstraterestičko zračenje na horizontalnu plohu je definirano kao:

$$E_{oh} = \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{n_{dan}}{365} 360^\circ\right)\right] E_o \sin \alpha_s \quad (3.12)$$

gdje je  $E_o$  solarna konstanta, 1.36 kW/m<sup>2</sup>.

Udio raspršenog zračenja na nagnutu plohu je definirano kao:

$$E_{d,\beta} = E_d \frac{1 + \cos \beta}{2} = K_d \frac{1 + \cos \beta}{2} E_g \quad (3.13)$$

Udio reflektirajućeg Sunčevog zračenja na nagnutu plohu je definiran kao:

$$E_{r,\beta} = \rho E_g \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (3.14)$$

gdje je  $\rho$  albedo (koeficijent reflektivnosti). Tablica 3.1 daje pregled vrijednosti albeda za različite tipove površina.

Tablica 3.1: Albedo vrijednosti za različite tipove površina

Tip terena	Albedo
Zelena polja	0.03 – 0.15
Šume	0.03 – 0.22
Uzorana polja	0.04 – 0.12
Vodene površine (jezero, more)	0.02 – 0.18
Pustinja	0.15 – 0.30
Ledene površine	0.43 – 0.60
Svježe snježne površine	0.68 – 1.00

Supstitucijom izraza (3.9), (3.13) i (3.14) u izraz (3.7), dobije se konačan izraz za određivanje ukupnog sunčevog zračenja na nagnutu plohu.

$$E_\beta = \left[ (1 - K_d)R_b + K_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho \frac{1 - \cos \beta}{2} \right] E_g \quad (3.15)$$

### 3.1.2. Energija vjetra

Svi globalni vjetrovi nastaju zbog razlike tlakova na Zemljinoj površini uslijed neravnomjernog zagrijavanja Zemlje Sunčevim zračenjem. Varijacije u polju atmosferskog tlaka su uzrokovane varijacijama prijenosa topline u atmosferi, što uzrokuje prelazak zraka s visokog na niski tlak [95]. Osim gradijenta tlaka, na atmosferske vjetrove također utječu sile inercije zraka, zemljina rotacija i sila trenja na zemljinoj površini, gdje se utjecaj svake od ovih sila na sustave atmosferskog vjetra razlikuje ovisno o razmjeru gibanja koje se razmatra [95]. Atmosferski granični sloj je najbliži zemljinoj površini, pa stoga kontakt sa zemljinom površinom izravno utječe na njegove karakteristike. Zemljina površina jako varira s velikim oceanskim površinama



i kopnenim masama, što značajno utječe na promjene fizikalnih veličina brzine strujanja, temperature i relativne vlažnosti u prostoru i vremenu [95].

Dostupna energija vjetra u jedinici vremena za određenu površinu se može odrediti prema kinetičkoj energiji mase zraka koja se giba neometanom brzinom strujanja u prostoru prema:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho_a A v_\infty^3 \quad (3.16)$$

gdje je  $\rho_a$  gustoća zraka,  $A$  je površina, a  $v_\infty$  je neometana brzina strujanja zraka u prostoru. Važan parametar pri određivanju dostupnosti energije vjetra je promjena horizontalne brzine vjetra s promjenom razmatrane visine, gdje horizontalna brzina vjetra na samoj zemljinoj površini jednaka nuli i raste s promjenom visine u atmosferskom graničnom sloju. Nadalje, osim globalnih utjecaja, na brzinu vjetra također utječu i parametri karakteristični za pojedinu lokaciju, od kojih je najznačajnija topografska karakteristika razmatranog terena. Promjenu horizontalne brzine vjetra u ovisnosti o visini i hrapavosti terena je opisana logaritamskim zakonom:

$$v = v_m \frac{\log\left(\frac{y}{y_0}\right)}{\log\left(\frac{y_m}{y_0}\right)} \quad (3.17)$$

gdje je  $v$  je brzina vjetra pri razmatranoj visini  $y$ ,  $v_m$  je poznata brzina vjetra na poznatoj visini  $y_m$ , a  $y_0$  je visina hrapavosti terena. Tablica 3.2 prikazuje vrijednosti hrapavosti terena za različite tipove terena prema [95, 96].

Tablica 3.2: Vrijednosti visine hrapavosti terena za različite tipove terena

Tip terena	$y_0$ (m)
Središta većih gradova	1
Šume	0.7
Predgrađa, šumovito seosko područje	0.3
Sela, krajolik s drvećem i živicom	0.1
Otvoreno poljoprivredno zemljište	0.03
Ravne travnate ravnice	0.01
Snježna površina	0.003
Rana pustinja, uzburkano more	0.001
Mirno more	$10^{-4}$
Vrlo glatka površina, led	$10^{-5}$

### 3.2. Profil opterećenja krajnjeg korisnika

Razmatrana su tri različita tipa profila opterećenja krajnjeg korisnika: konstantan profil opterećenja; stohastički profil opterećenja; impulsni profil opterećenja. Kako bi se osigurala usporedivost rezultata simulacija, svi razmatrani profili opterećenja imaju jednaku vrijednost ukupne godišnje energetske potrebe od 4.34 MWh/god.

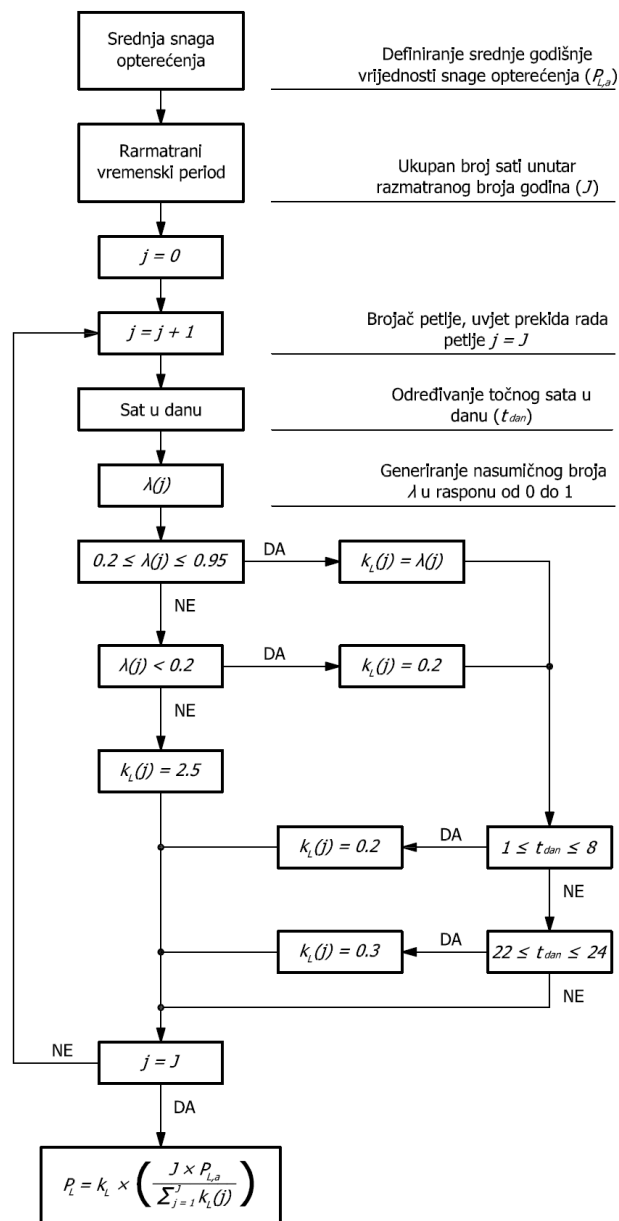
#### 3.2.1. Konstantan profil opterećenja

Konstantnim profilom opterećenja se simulira opterećenje telekomunikacijske bazne stanice smještene na udaljenoj lokaciji s malim oscilacijama u broju korisnika. Telekomunikacijske bazne stanice na udaljenim lokacijama su u pravilu mali potrošači. Prema podacima od službe za održavanje telekomunikacijskih stanica, opterećenje ovakvih baznih stanica iznosi 500 W tokom cijele godine.

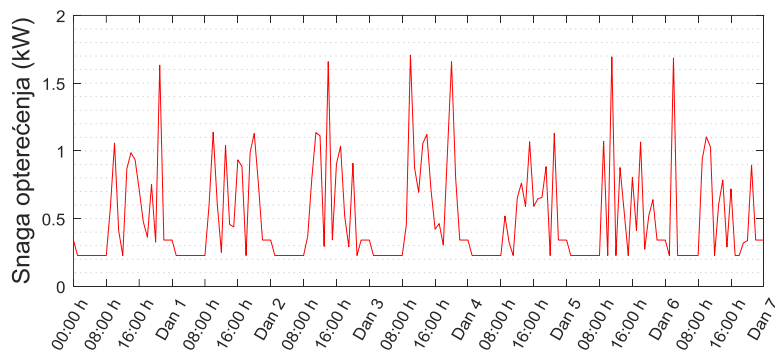
#### 3.2.2. Stohastički profil opterećenja

Kako bi se izvršila simulacija potreba za električnom energijom jednog kućanstva odvojenog od energetske mreže, izrađen je algoritam za generiranje stohastičkog profila opterećenja, slika 3.6. Dizajniranje profila opterećenja kućanstva odvojenog od energetske mreže kao krajnjeg korisnika nije jednostavan zadatak, jer takav profil opterećenja treba obuhvaćati energetske potrebe, navike i nepredvidljivo i nasumično ponašanje krajnjeg korisnika. Predloženi algoritam za generiranje stohastičkog profila opterećenja uzima u obzir komponentu konstantnih godišnjih energetske potrebe i nasumična vršna opterećenja trošila visoke snage. To je postignuto generiranjem jednoliko raspodijeljenog nasumičnog broja ( $\lambda$ ), u rasponu od 0 do 1, te kalibracijom vrijednosti rubnih uvjeta za donošenje odluka i marginalnih koeficijenata intenziteta opterećenja ( $k_L$ ). U literaturi se u svrhu simuliranja profila opterećenja kućanstva često koriste normalizirani profili opterećenja. Međutim, takav tip profila opterećenja opisuje pogodnosti korištenja energetske mreže, gdje je energija uvijek dostupna i gdje nema potrebe za suzdržano korištenje energije, što nije slučaj kod HRES-a. Predloženi algoritam za generiranje stohastičkog profila opterećenja izostavlja nekontroliranu i nepromišljenu komponentu potrošnju energije, koja je prisutna kod normaliziranih profila opterećenja, dok zadržava konstantnu komponentu opterećenja uz nepredvidljive i nasumične vršne snage. Na ovaj način se postiže da svaki dan kroz razmatrani vremenski period od 20 godina ima drugu vrijednost srednjeg dnevnog opterećenja, dok je vrijednost srednjeg godišnjeg opterećenja

uvijek jednaka. Slika 3.7 prikazuje primjer generiranog stohastičkog profila opterećenja za vremenski period od jednog tjedna.



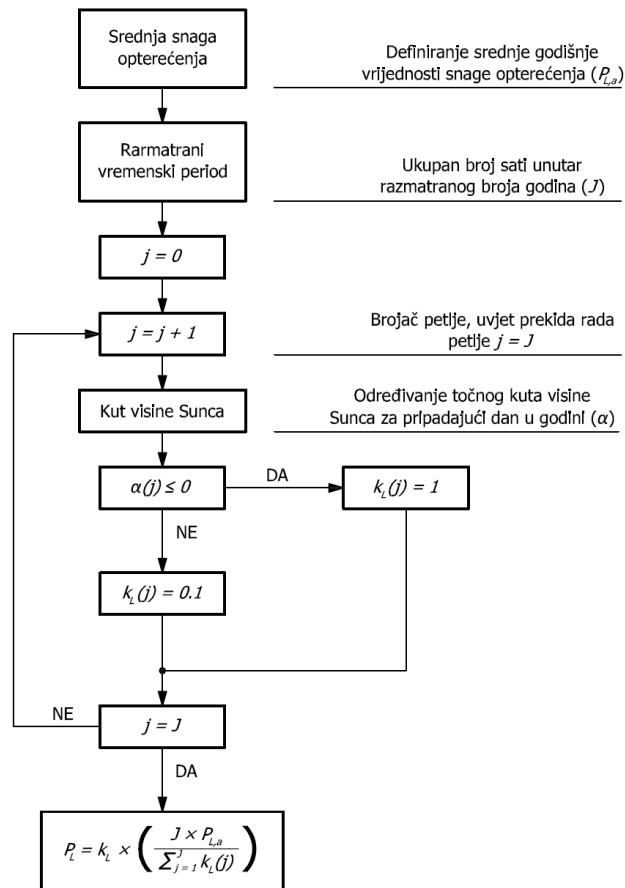
Slika 3.6: Dijagram toka algoritma za generiranje stohastičkog profila opterećenja



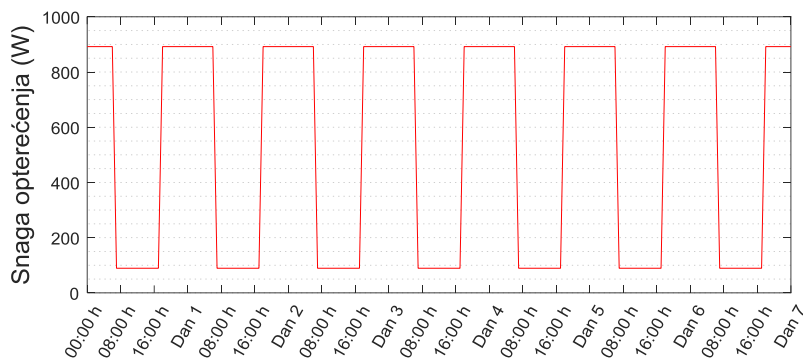
Slika 3.7: Primjer stohastičkog profila opterećenja za vremenski period od jednog tjedna

### 3.2.3. Impulsni profil opterećenja

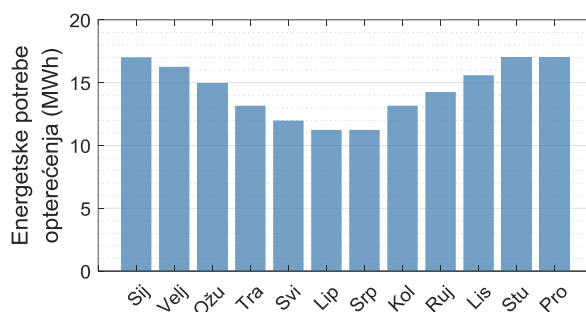
Impulsnim profilom opterećenja se simulira opterećenja sustava rasvjete, gdje je trajanje intervala između snage minimalnog i maksimalnog opterećenja upravljano izlascima i zalascima Sunca. Prema tome, pošto kut visine Sunca izravno ovisi o zemljopisnoj širi, svaki generirani profil opterećenja će izravno ovisiti o razmatranoj lokaciji. Dijagram toka algoritma logike generiranja impulsnog profila opterećenja je prikazan na slici 3.8, a slika 3.9 prikazuje primjer generiranog impulsnog opterećenja za vremenski period od jednog tjedna. Nadalje, razmatrani impulsni profil opterećenja također sadržava komponentu sezonske oscilacije energetske potreba opterećenja, koja proizlazi iz razlike trajanja dana i noći tokom godine, slika 3.10.



Slika 3.8: Dijagram toka algoritma za generiranje impulsnog profila opterećenja



Slika 3.9: Primjer impulsnog profila opterećenja za vremenski period od jednog tjedna



Slika 3.10: Prosječne mjesečne energetske potrebe impulsnog profila opterećenja

### 3.3. Fotonaponski modul

Izlazna snaga PV modula ( $P_{PV}$ ), za razmatrani vremenski period, je definirana kao:

$$P_{PV}(t) = E_{\beta}(t) \cdot A_{PV} [\eta_{PV}(t) + \mu_{P,st}(T_c(t) - T_{c,st})] \cdot \eta_{DC} \quad (3.18)$$

gdje je  $E_{\beta}$  ukupno Sunčevo zračenje na nagnutu plohu definirano izrazom (3.15),  $A_{PV}$  je efektivna površina PV modula,  $\eta_{PV}$  je učinkovitost PV modula za razmatrani vremenski period  $t$ ,  $\mu_{P,st}$  je temperaturni koeficijent snage,  $T_c$  je temperatura PV ćelije za razmatrani vremenski period  $t$ ,  $T_{c,st}$  je radna temperatura ćelije pri standardnim radnim uvjetima, a  $\eta_{DC}$  je učinkovitost DC/DC naponskog pretvarača. Temperatura PV ćelije je definirana kao:

$$T_c(t) = T_a(t) + (NOCT - 20 \text{ }^{\circ}\text{C}) \frac{E_{\beta}(t)}{800 \text{ W m}^{-2}} \quad (3.19)$$

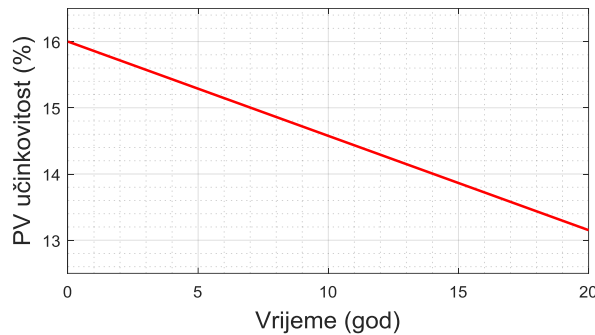
gdje je  $T_a$  temperatura okolnog zraka,  $NOCT$  je nominalna radna temperatura ćelije (*engl. Nominal Operating Cell Temperature*). Tablica 3.3 prikazuje tehničke specifikacije PV modula.

Životni vijek PV modula je procijenjen na 20 godina, a tijekom predviđenog životnog vijeka, učinkovitost PV modula će postepeno degradirati. Stopa degradacije učinkovitosti PV modula

je procijenjena na 0.89% vrijednosti nazivne učinkovitosti godišnje, što odgovara silicijskom monokristalnom tipu PV modula [97]. Slika 3.11 prikazuje funkciju pada PV učinkovitosti u ovisnosti o vremenu.

Tablica 3.3: Parametri radne karakteristike PV modula

Parametar	Opis		
$\mu_{P,st}$	Temperaturni koeficijent snage	-0.35	% °C <sup>-1</sup>
$T_{c,st}$	Radna temperatura ćelije pri standardnim radnim uvjetima	25	°C
$\eta_{PV,BoL}$	PV učinkovitost na početku životnog vijeka	16	%
$NOCT$	Nominalna radna temperatura ćelije	47	°C



Slika 3.11: Funkcija pada učinkovitosti PV modula

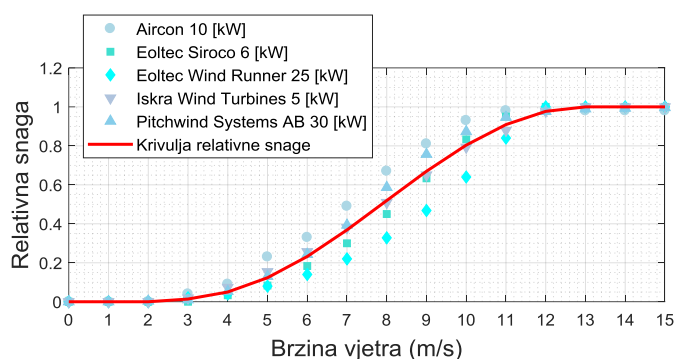
### 3.4. Vjetroturbina

Razmatranjem geometrije rotora vjetroturbine u izraz za snagu vjetra (3.16), dobije se izraz za izlaznu snagu vjetroturbine ( $P_{WT}$ ), definiran kao:

$$P_{WT} = \frac{1}{2} \rho_a A_{WT} v^3 C_p(\lambda_{WT}, \phi) \quad (3.20)$$

gdje je  $\rho_a$  gustoća zraka,  $A_{WT}$  je efektivna površina rotora vjetroturbine,  $v$  je brzina vjetra, a  $C_p$  je koeficijent snage vjetroturbine u ovisnosti o omjeru vršnih brzina  $\lambda_{WT}$  (*engl. Tip Speed Ratio*) i kutu zakreta lopatice vjetroturbine  $\phi$ . Svaka vjetroturbina ima svoju radnu karakteristiku koja izravno ovisi o aeroprofilu lopatice rotora, omjeru vršnih brzina, kutu zakreta lopatice itd. [95, 96]. Radna karakteristika vjetroturbine je opisana krivuljom snage u ovisnosti o brzini vjetra. Kako bi određivanje proizvodnja energije iz vjetroturbine za svaki razmatrani slučaj bio neovisan o specifičnoj vjetroturbini sa specifičnim nazivnim kapacitetom

i radnim karakteristikama, za potrebe ovog istraživanja je izrađena funkcija relativne snage vjetroturbine u ovisnosti o brzinama vjetra, slika 3.12. Razmatrana krivulja relativne snage je izrađena kao srednja vrijednost više različitih poznatih WT radnih karakteristika.



Slika 3.12: Krivulja relativne snage vjetroturbine u ovisnosti o brzini vjetra

Prema definiranoj WT relativnoj krivulji, izlazna snaga vjetroturbine je definirana kao:

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & ; v < v_{ci} \\ P_{WT,rel} \cdot P_{WT,r} \cdot \eta_{AC} & ; v_{ci} \leq v < v_r \\ P_{WT,r} \cdot \eta_{AC} & ; v_r \leq v < v_{co} \\ 0 & ; v \geq v_{co} \end{cases} \quad (3.21)$$

gdje je  $P_{WT,rel}$  relativna snaga vjetroturbine,  $P_{WT,r}$  je nazivna snaga vjetroturbine,  $\eta_{AC}$  je učinkovitost AC/DC naponskog pretvarača,  $v_{ci}$  je ulazna brzina vjetra (*engl. cut-in wind speed*),  $v_r$  je nazivna brzina vjetra, a  $v_{co}$  je izlazna brzina vjetra (*engl. cut-out wind speed*). Tablica 3.4 prikazuje radne karakteristike relativne vjetroturbine.

Tablica 3.4: Radne karakteristike relativne vjetroturbine

Parametar	Opis	
$v_{ci}$	Ulazna brzina vjetra	3 m s <sup>-1</sup>
$v_{co}$	Izlazna brzina vjetra	25 m s <sup>-1</sup>
$v_r$	Nazivna brzina vjetra	13 m s <sup>-1</sup>

### 3.5. Olovno-kiselinska baterija

Napon punjenja/praznjenja baterije ( $U_{BT}$ ) je definiran prema Copettijevom modelu baterije [98]:

$$U_{BT} = \begin{cases} 1.965 + 0.12SoC_{BT} - \frac{|I_{BT}|}{C_{10}} \left( \frac{4}{1 + |I_{BT}|^{1.3}} + \frac{0.27}{SoC_{BT}^{1.5}} + 0.02 \right) \tau_{BT}, & \forall I_{BT} \leq 0 \\ 2 + 0.16SoC_{BT} - \frac{I_{BT}}{C_{10}} \left( \frac{6}{1 + I_{BT}^{0.86}} + \frac{0.48}{(1 - SoC_{BT})^{1.2}} + 0.036 \right) \tau_{BT}, & \forall I_{BT} > 0 \end{cases} \quad (3.22)$$

gdje je  $SoC_{BT}$  stanje napunjenosti baterije,  $I_{BT}$  struja punjenja/pražnjenja baterije,  $C_{10}$  je kapacitet baterije za 10 satno pražnjenje, a  $\tau_{BT}$  je faktor utjecaja temperature, koji je definiran kao:

$$\tau_{BT} = \begin{cases} (1 - 0.007 \cdot \Delta T_{BT}), & \forall I_{BT} \leq 0 \\ (1 - 0.025 \cdot \Delta T_{BT}), & \forall I_{BT} > 0 \end{cases} \quad (3.23)$$

gdje je  $\Delta T_{BT}$  razlika temperatura između temperature baterije i referentne temperature od 25 °C. Stanje napunjenosti baterije se određuje prema sljedećem izrazu:

$$SoC_{BT} = SoC_{BT,0} + \frac{\eta_{BT}}{C_{BT}(t)} \int_{t_0}^t I_{BT}(t) dt \quad (3.24)$$

gdje je  $SoC_{BT,0}$  stanje napunjenosti baterije u razmatranom vremenu  $t_0$ ,  $\eta_{BT}$  je učinkovitost punjenja/pražnjenja baterije, a  $C_{BT}$  je preostali kapacitet baterije u razmatranom vremenskom periodu  $t$ .

### 3.5.1. Model dinamike gubitka kapaciteta olovno-kiselinske baterije

Dinamika gubitka kapaciteta olovno-kiselinske baterije je definirana modelom težinskog protoka energije kroz bateriju, koji se zasniva na pretpostavci da su stvarni uvjeti pod kojima baterija radi tipično mnogo teži od radnih uvjeta korištenih pri standardnim testovima životnog vijeka [65]. Modelom težinskog protoka energije se razmatraju dva različita mehanizma gubitka kapaciteta: gubitak kapaciteta uslijed korozije; gubitak kapaciteta uslijed degradacije aktivne mase. Kraj životnog vijeka baterije se smatra trenutak kad preostali kapacitet baterije padne na 80% vrijednosti nazivnog kapaciteta na početku životnog vijeka. Preostali kapacitet baterije ( $C_{BT}$ ) u razmatranom vremenskom periodu  $t$  je definiran kao:

$$C_{BT}(t) = C_{BT,r} - C_{kor}(t) - C_{deg}(t) \quad (3.25)$$



gdje je  $C_{BT,r}$  nazivni kapacitet baterije,  $C_{kor}$  je gubitak kapaciteta baterije izazvan mehanizmom korozije u razmatranom vremenskom periodu  $t$ , a  $C_{deg}$  je gubitak kapaciteta baterije izazvan mehanizmom degradacije aktivne mase u razmatranom vremenskom periodu  $t$ .

Dinamika gubitka kapaciteta uslijed degradacije aktivne mase je definirana kao:

$$C_{deg}(t) = C_{BT}^{EOL} \cdot \exp\left(3.125 \cdot \frac{Z_W(t)}{Z_{IEC}} - 5\right) \quad (3.26)$$

gdje je  $C_{BT}^{EOL}$  preostali kapacitet baterije na kraju životnog vijeka,  $Z_{IEC}$  je broj ciklusa prema Međunarodnoj elektrotehničkoj komisiji (*engl. International Electrotechnical Commission, IEC*), a  $Z_W$  je težinski broj ciklusa bez utjecaja korozije u razmatranom vremenskom periodu  $t$ . Težinski broj ciklusa bez utjecaja korozije je definiran kao:

$$Z_W(t + \Delta t) = Z_W(t) + \frac{|I_{BT}(t)| \cdot f_{SOC}(t) \cdot f_{acid}(t) \cdot \Delta t}{C_{BT,r}}, \quad \forall I_{BT} < 0 \quad (3.27)$$

gdje je  $C_{BT,r}$  nazivni kapacitet baterije,  $f_{SOC}$  je faktor stanja napunjenosti baterije, a  $f_{acid}$  je faktor utjecaja kiselinske stratifikacije na degradaciju aktivne mase. Niske vrijednosti  $SoC_{BT}$  kroz duži vremenski period utječu na gubitak kapaciteta baterije mehaničkim stresom aktivne mase i rastom sulfatnih kristala. Na životni vijek baterije izravno utječu vremenski raspon između najniže vrijednosti  $SoC_{BT}$  i punog punjenja baterije, kao i ukupno vrijeme koje baterija provede pri niskom  $SoC_{BT}$  [65, 66]. Utjecaj provedenog vremena na niskim vrijednostima  $SoC_{BT}$  i vremena između punih punjenja je opisano faktorom stanja napunjenosti baterije (3.28), gdje faktor s vremenom postepeno raste u ovisnosti o stanju napunjenosti, jakosti struje i vremenu, te se resetira svakim punim punjenjem baterije:

$$f_{SOC}(t) = 1 + [c_{SOC,0} + c_{SOC,min} \cdot (1 - SoC_{BT,min}(t)|_{t_0}^t)] \cdot f_I(I_{BT}, n) \cdot (t - t_0) \quad (3.28)$$

gdje je  $SoC_{BT,min}$  minimalna vrijednost stanja napunjenosti baterije od zadnjeg punog punjenja,  $c_{SOC,0}$  je konstanta prirasta faktora stanja napunjenosti baterije pri  $SoC_{BT} = 0$ ,  $c_{SOC,min}$  je konstanta prirasta faktora stanja napunjenosti baterije pri  $SoC_{BT,min}$ , a  $f_I$  je faktor struje u funkciji struje punjenja/pražnjenja baterije i broja loših (nepotpunih) punjenja baterije  $n_{BT}$ . Faktor struje razmatra utjecaj struje na olovno-sulfatne kristale, te utjecaj struje pražnjenja nakon potpunog punjenja baterije na ukupan broj kristala [65, 66]. Nadalje, ako je punjenje baterije izvrši do  $SoC_{BT}$  u rasponu većem od 0.9 i manjem do 1, ukupan broj kristala će biti

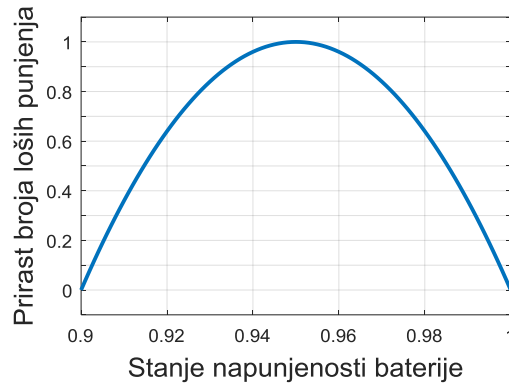
manji, ali će kristali koji ostanu biti veći, pa se stoga ovakvo punjenje baterije smatra loše punjenje. Faktor struje je definiran kao:

$$f_I = \sqrt{\frac{I_{10}}{|I_{BT}(t)|}} \cdot \sqrt[3]{\exp\left(\frac{n_{BT}(t)}{3.6}\right)} \quad (3.29)$$

gdje je  $I_{10}$  jakost struje potrebna za 10 satno pražnjenje baterije ( $I_{10} = C_{10}/10$  h). Ukupan broj loših punjenja postepeno raste svaki put kad  $SoC_{BT}$  dosegne vrijednost poviše 0.9, ali ne dosegne vrijednost 1, pa opet nakon toga padne ispod 0.9. Funkcija prirasta broja loših punjenja baterije je definirana kao:

$$n_{BT}(t + \Delta t) = n_{BT}(t) + \frac{0.0025 - \left(0.95 - SoC_{BT,max}(t)\right)^2}{0.0025}, \quad 0.9 < SoC_{BT,max} < 1 \quad (3.30)$$

gdje je  $SoC_{BT,max}$  najviša vrijednost stanja napunjenosti baterije koja se postigne prilikom jednog punjenja u razmatranom vremenskom periodu  $t$ . Slika 3.13 prikazuje funkciju prirasta broja loših punjenja u ovisnosti o stanju napunjenosti baterije.



Slika 3.13: Prirast broja loših punjenja u ovisnosti o stanju napunjenosti baterije

Faktor utjecaja kiselinske stratifikacije na degradaciju aktivne mase je pod velikim utjecajem malih struja, jer su struje niskih vrijednosti nehomogenije u usporedbi sa većim strujama [65]. Kiselinska stratifikacija ostvaruje prirast uslijed cikličkog režima rada baterije, te je više izražena pri nižim vrijednostima  $SoC_{BT}$  i višim vrijednostima struje pražnjenja, dok se opadanje kiselinske stratifikacije povezuje sa stvaranjem plinova (*engl. gassing*) i difuzije [66]. Faktor utjecaja kiselinske stratifikacije je definiran kao:

$$f_{acid} = 1 + f_{strat}(t) \cdot \sqrt{\frac{I_{10}}{|I_{BT}(t)|}} \quad (3.31)$$

gdje je  $f_{strat}$  faktor stratifikacije, definiran kao funkcija faktora prirasta stratifikacije ( $f_{plus}$ ) i faktora opadanja stratifikacije ( $f_{minus}$ ).

$$f_{strat}(t + \Delta t) = f_{strat}(t) + (f_{plus}(t) - f_{minus}(t)) \Delta t \quad (3.32)$$

Faktor prirasta stratifikacije je definiran kao funkcija struje pražnjenja i minimalne vrijednosti stanja napunjenosti baterije.

$$f_{plus}(t) = \frac{1}{30} (1 - SoC_{BT,min}(t)|_{t_0}^t) \cdot \exp(-3 \cdot f_{strat}(t)) \frac{|I_{BT}(t)|}{I_{10}}, \quad \forall I_{BT} < 0 \quad (3.33)$$

Faktor opadanja stratifikacije je definiran kao zbroj faktora opadanja stratifikacije uslijed stvaranja plinova ( $f_{minus,gass}$ ) i faktora opadanja stratifikacije uslijed difuzije ( $f_{minus,diff}$ ).

$$f_{minus}(t) = f_{minus,gass}(t) + f_{minus,diff}(t) \quad (3.34)$$

Opadanje procesa stratifikacije uslijed stvaranja plinova započinje samo za napone poviše 2.3 V, te se pretpostavlja da stvaranje plinova raste eksponencijalno s porastom napona i temperature [66]. Nadalje, također se pretpostavlja da je efekt miješanja izravno proporcionalan količini generiranih plinova. Faktor opadanja stratifikacije uslijed generiranja plinova je definiran kao:

$$f_{minus,gas}(t) = 0.1 \cdot \sqrt{\frac{100 \text{ Ah}}{C_{BT,r}}} \cdot \frac{I_{gas}(t)}{I_{gas,0}} \exp[c_U(U_{BT} - U_{gas,0}) + c_T(T_{BT} - T_{gas,0})] \quad (3.35)$$

gdje je  $I_{gas}$  normalizirana struja stvaranja plinova u razmatranom vremenskom periodu  $t$  gdje se razmatra trenutno stanje baterije,  $I_{gas,0}$  je inicijalna vrijednost normalizirane struje stvaranja plinova,  $U_{gas,0}$  je nominalni napon stvaranja plinova,  $c_U$  je naponski koeficijent struje stvaranja plinova,  $T_{BT}$  je temperatura baterije,  $T_{gas,0}$  je nominalna temperatura stvaranja plinova, a  $c_T$  je temperaturni koeficijent struje stvaranja plinova. Normalizirana struja stvaranja plinova je definirana kao:

$$I_{gas}(t) = \frac{C_{BT,r}}{100 \text{ Ah}} \cdot I_{gas,0} \cdot \exp[c_U(U_{BT} - U_{gas,0}) + c_T(T_{BT} - T_{gas,0})] \quad (3.36)$$

Za razliku od procesa stvaranja plinova, proces difuzije je spor, te pokazuje veći utjecaj na opadanje procesa stratifikacije tek za vrijeme dužih pauza [66]. Faktor opadanja stratifikacije uslijed difuzije je definiran kao:

$$f_{minus,dif}(t) = \frac{8 \cdot c_{diff}}{h_{BT}^2} \cdot f_{strat}(t) \cdot 2^{\frac{T_{BT}-20^\circ\text{C}}{10\text{K}}} \quad (3.37)$$

gdje je  $h_{BT}$  visina baterije, a  $c_{diff}$  je efektivna difuzijska konstanta. Efektivna difuzijska konstanta razmatra unutarnju geometriju baterije i prepreke procesu difuzije od strane separatora [66].

Modeliranje procesa korozije se bazira na konceptu određivanja prirasta debljine korozivnog sloja, koji postepeno raste za vrijeme životnog vijeka baterije. Gubitak kapaciteta izazvan korozijom je opisan prirastom unutarnjeg otpora proporcionalnom prirastu korozivnog sloja [65, 66]. Dinamika gubitka kapaciteta izazvana procesom korozije je definirana kao:

$$C_{kor}(t) = C_{BT}^{EOL} \frac{\Delta W(t)}{\Delta W_{lim}} \quad (3.38)$$

gdje je  $\Delta W$  efektivna debljina korozivnog sloja u razmatranom vremenskom periodu  $t$ , a  $\Delta W_{lim}$  je rubni uvjet debljine korozivnog sloja kojim se definira kraj životnog vijeka baterije. Vrijednost rubnog uvjeta korozivnog sloja je definirana kao:

$$\Delta W_{lim} = L_{BT}^{float} \cdot k_{s,lim} \quad (3.39)$$

gdje je  $L_{BT}^{float}$  životni vijek baterije definiran od strane proizvođače (*engl. Float Lifetime*), a  $k_{s,lim}$  je granični parametar brzine stvaranja korozivnog sloja za napon  $U_{gas,0}$ . Prirast efektivne debljine korozivnog sloja varira u ovisnosti o promjeni korozijskog napona pozitivne elektrode, te je definiran kao:

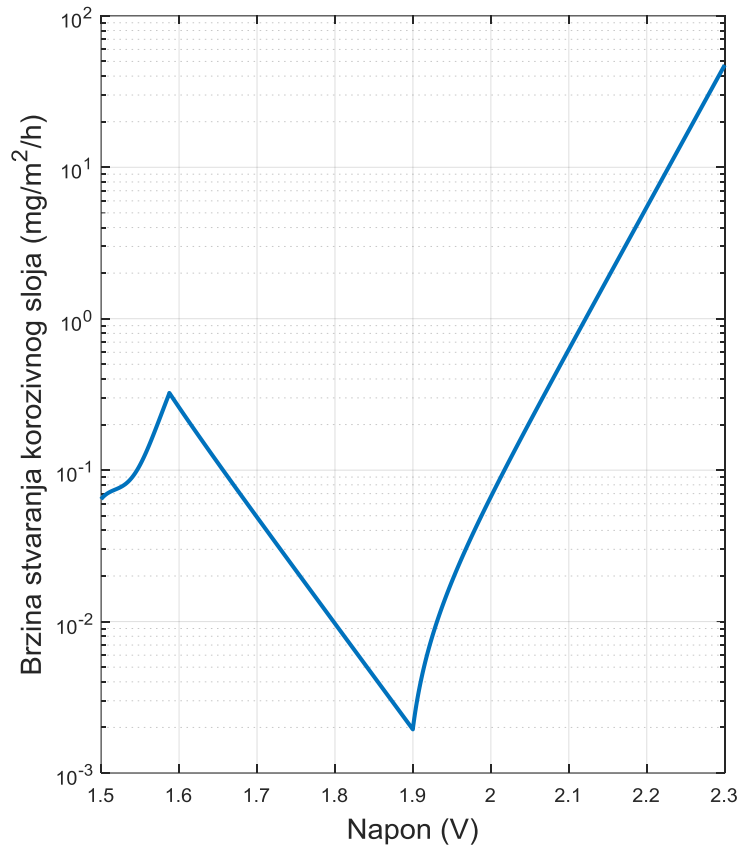
$$\Delta W(t) = \begin{cases} k_s \left[ \left( \frac{\Delta W(t - \Delta t)}{k_s} \right)^{\frac{1}{0.6}} + \Delta t \right]^{0.6}, & \forall U_{kor} < 1.74 \text{ V} \\ \Delta W(t - \Delta t) + k_s \cdot \Delta t, & \forall U_{kor} \geq 1.74 \text{ V} \end{cases} \quad (3.40)$$

gdje je  $k_s$  parametar brzine stvaranja korozivnog sloja, a  $U_{kor}$  je korozijski napon pozitivne elektrode. Parametar brzine stvaranja korozivnog sloja je definiran kao:

$$k_s = k(U_{kor}) \cdot \exp \left[ \frac{\ln 2}{15 \text{ K}} \cdot (T_{BT} - T_{kor,0}) \right] \quad (3.41)$$

gdje je  $T_{kor,0}$  nominalna temperatura stvaranja korozivnog sloja, a  $k$  je brzina stvaranja korozivnog sloja u funkciji napona korozije  $U_{kor}$ . Funkcija brzine stvaranja korozivnog sloja je bazirana na istraživanju [99], gdje je eksperimentalno utvrđena veza između napona

pozitivne elektrode i brzine rasta korozivnog sloja. Brzina stvaranja korozivnog sloja je definirana prema krivuljom prikazanom na slici 3.14.



Slika 3.14: Brzina stvaranja korozivnog sloja u funkciji napona

Napon korozije pozitivne elektrode je definiran kao:

$$U_{kor}(t) = \begin{cases} U_{kor,0} - \frac{10}{13} g_c (1 - SoC_{BT}) + \frac{1}{2} \rho_c \frac{I_{BT}(t)}{C_{BT,r}} \left( 1 + \frac{M_c \cdot SoC_{BT}}{C_c - SoC_{BT}} \right), & \forall I_{BT} > 0 \\ U_{kor,0} - \frac{10}{13} g_d (1 - SoC_{BT}) + \frac{1}{2} \rho_d \frac{I_{BT}(t)}{C_{BT,r}} \left( 1 + \frac{M_c \cdot SoC_{BT}}{C_d - SoC_{BT}} \right), & \forall I_{BT} \leq 0 \end{cases} \quad (3.42)$$

gdje je  $U_{kor,0}$  napon korozije napunjene baterije bez protoka struje,  $g_c$  i  $g_d$  su konstante proporcionalnosti elektrolita punjenja i pražnjenja,  $\rho_c$  i  $\rho_d$  su efektivni unutarnji otpori punjenja i pražnjenja,  $M_c$  i  $M_d$  su koeficijenti prenapona prijenosa naboja prilikom punjenja i pražnjenja, a  $C_c$  i  $C_d$  su normalizirani kapaciteti punjenja i pražnjenja. Tablica 3.5 prikazuje pregled svih konstantnih vrijednosti korištenih u modelu gubitka kapaciteta baterije prema [66], a tablica 3.6 prikazuje pregled tehničkih specifikacija 10 OPzS1000 baterije [100, 101].

Tablica 3.5: Pregled konstantnih vrijednosti koeficijenata

Parametar	Opis		
$I_{gas,0}$	Inicijalna normalizirana struja stvaranja plinova	20	mA
$U_{gas,0}$	Nominalni napon stvaranja plinova	2.23	V
$U_{kor,0}$	Napon korozije napunjene baterije	1.75	V
$T_{gas,0}$	Nominalna temperatura stvaranja plinova	298	K
$T_{kor,0}$	Nominalna temperatura korozije	298	K
$c_{diff}$	Efektivna difuzijska konstanta	$2 \cdot 10^{-9}$	$m^2 s^{-1}$
$c_{SoC,0}$	Konstanta prirasta $f_{SoC}$ pri $SoC_{BT} = 0$	$6.614 \cdot 10^{-5}$	$h^{-1}$
$c_{SoC,min}$	Konstanta prirasta $f_{SoC}$ pri $SoC_{BT,min}$	$3.307 \cdot 10^{-3}$	$h^{-1}$
$c_U$	Naponski koeficijent struje stvaranja plinova	11	$V^{-1}$
$c_T$	Temperaturni koeficijent struje stvaranja plinova	0.06	$K^{-1}$

Tablica 3.6: Pregled tehničkih specifikacija 10 OPzS1000 baterije

Parametar	Opis		
$L_{BT}^{float}$	Životni vijek baterije ( <i>engl. Float Lifetime</i> )	18	godina
$h_{BT}$	Visina baterije	0.6	m
$g_c$	Konstanta proporcionalnosti elektrolita punjenja	0.13071	V
$g_d$	Konstanta proporcionalnosti elektrolita pražnjenja	0.09654	V
$\rho_c$	Efektivni unutarnji otpor punjenja	0.43609	$\Omega Ah$
$\rho_d$	Efektivni unutarnji otpor pražnjenja	0.37885	$\Omega Ah$
$M_c$	Koeficijent prenapona prijenosa naboja punjenja	0.36488	–
$M_d$	Koeficijent prenapona prijenosa naboja pražnjenja	0.28957	–
$C_c$	Normalizirani kapacitet punjenja	1.642	–
$C_d$	Normalizirani kapacitet pražnjenja	1.001	–

### 3.6. PEM elektrolizator

Radna karakteristika PEM elektrolizatora je opisana polarizacijskom krivuljom, koja je definirana kao:

$$U_{EL} = U_{EL,oc} + U_{EL,act} + U_{EL,ohm} + U_{EL,con} \quad (3.43)$$

gdje je  $U_{EL}$  napon članaka elektrolizatora pri nekoj struji,  $U_{EL,oc}$  je napon otvorenog kruga,  $U_{EL,act}$  je aktivacijski prenapon,  $U_{EL,ohm}$  je prenapon uzrokovan ohmskim gubitcima, a  $U_{EL,con}$  je koncentracijski prenapon. Napon otvorenog kruga je definiran kao [92, 102]:

$$U_{EL,oc} = U_{EL,rev} + \frac{RT_p}{nF} \ln \left( \frac{p_{H_2,p} \cdot p_{O_2,p}^{0.5}}{p_{H_2O,p}} \right) \quad (3.44)$$

gdje je  $U_{EL,rev}$  reverzibilni potencijal ćelije pri standardnom tlaku i temperaturi,  $R$  je univerzalna plinska konstanta,  $T_p$  je temperatura procesa,  $n$  je broj uključenih elektrona,  $F$  je Faraday-eva konstanta,  $p_{H_2,p}$  je parcijalni tlak vodika,  $p_{O_2,p}$  je parcijalni tlak kisika, a  $p_{H_2O,p}$  je parcijalni tlak vode. Reverzibilni potencijal ćelije je definiran kao:

$$U_{EL,rev} = 1.229 - 0.846 \cdot 10^{-3}(T_p - 298) \quad (3.45)$$

Aktivacijski prenapon je gubitak koji može biti opisan kao energija potrebna za pokretanje reakcije, te je pod izravnim utjecajem temperature, materijala katalitičkog sloja i opterećenja [92]. Aktivacijski prenapona je definiran kao:

$$U_{EL,act} = b \log \left( \frac{i + i_{loss}}{i_o} \right) \quad (3.46)$$

gdje je  $b$  Tafelov broj,  $i$  je gustoća struje,  $i_{loss}$  je gustoća struje parazitskih gubitaka struje i vodika, a  $i_o$  je gustoća struje izmjene. Tafelov broj je definiran kao:

$$b = 2.3 \frac{RT_p}{\alpha F} \quad (3.47)$$

gdje je  $\alpha$  koeficijent prijelaza naboja. Koeficijent prijenosa naboja ovisi o temperaturi, a opisuje ravnotežu brzine reakcije [102].

Ohmski gubici su uzrokovani unutarnjim otporima komponenti članka prema protoku elektrona i otporom prolaska protona kroz membranu [92]. Prenapon uzrokovan ohmskim gubiticima je definiran kao:

$$U_{EL,ohm} = iR_{EL,i} \quad (3.48)$$

gdje je  $R_{EL,i}$  unutarnji otpor članka elektrolizatora.

Prenapon koncentracije proizlazi iz ograničenja prijenosa mase na elektrodama, te je značajan pri visokim gustoćama struje [102]. Prenapon koncentracije je definiran kao:

$$U_{EL,con} = -\frac{b}{n} \log \left( 1 - \frac{i}{i_L} \right) \quad (3.49)$$

gdje je  $i_L$  gustoća struje ograničenja, a  $n$  je broj uključenih elektrona.

Učinkovitost PEM elektrolizatora izravno proizlazi iz polarizacijske krivulje i obrnuto je proporcionalna potencijalu ćelije, što izravno odgovara stopi proizvodnje vodika [19]. Više vrijednosti napona bi rezultirale boljom proizvodnjom vodika, ali i manjom učinkovitošću. Učinkovitost elektrolizatorovog uređaja ( $\eta_{EL}$ ) (*engl. electrolyzer system efficiency*), za gornju ogrjevnu moć vodika (*engl. High Heating Value, HHV*), je definirana kao [19]:

$$\eta_{EL} = \frac{1.482}{U_{EL}} \cdot \frac{i - i_{loss}}{i} \cdot \frac{\eta_{DC}}{1 + r_{EL,p}} \quad (3.50)$$

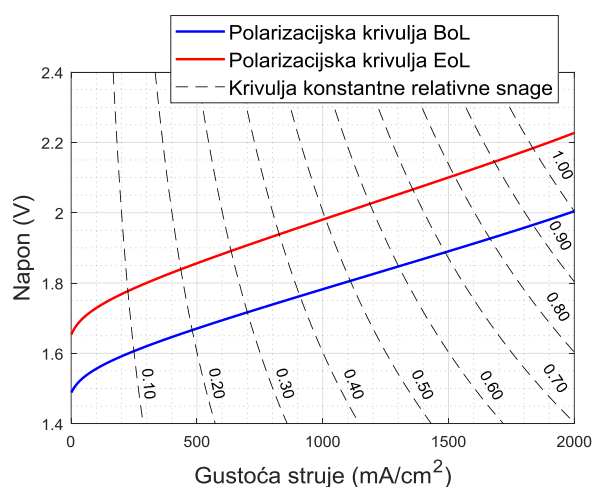
gdje je  $\eta_{DC}$  učinkovitost DC/DC naponskog pretvarača, a  $r_{EL,p}$  je omjer parazitske snage i neto ulazne snage elektrolizatora. Dodatni gubitci snage su izravno povezani s pomoćnom opremom elektrolizatorovog uređaja, kao što su vodena pumpa, ventilator, upravljačka jedinica itd. Na učinkovitost elektrolizatora mogu dodatno utjecati radni tlak i temperatura [19]. Visoki radni tlakovi mogu uzrokovati prodor vodika kroz polimernu membranu, dok rad izvan nominalnog temperaturnog područja može rezultirati nižom učinkovitošću. Vrlo varijabilan izvor energije je glavni razlog zašto elektrolizator ne bi bio u stanju postići standardnu radnu temperaturu. Još jedan problem s visoko varijabilnim izvorom energije su male vrijednosti snage. Rad elektrolizatora pri malim vrijednostima snage može uzrokovati da brzina proizvodnje vodika i kisika budu istog reda veličine kao i brzina kojom ti plinovi prodiru kroz elektrolit i miješaju se jedan s drugim [19]. Prema tome, za raspon relativne snage od 0 do 10%, rad elektrolizatora će biti onemogućen.

U literaturi je životni vijek svežnja PEM elektrolizatora procijenjen na 40,000 radnih sati ili 5,000 ciklusa uključivanja i isključivanja, te se zamjena svežnja razmatra jednom kad nazivna vrijednost proizvodnog kapaciteta vodika padne na 90% vrijednosti na početku životnog vijeka [103, 104]. Pad učinkovitosti PEM elektrolizatora je uzrokovan rastom napona uzrokovanog oksidacijom katalitičkog sloja i uravnoteženju sadržaja vode u membrani [19]. Prema rubnim uvjetima o životnom vijeku svežnja PEM elektrolizatora, usvojenima iz literature [103, 104], određena je polarizacijska krivulja kojom se definira kraj životnog vijeka svežnja PEM elektrolizatora, slika 3.15, a prema dobivenoj polarizacijskoj krivulji na kraju životnog vijeka je definirana i krivulja učinkovitosti na kraju životnog vijeka u funkciji relativne snage, slika 3.16. Tablica 3.7 prikazuje ključne parametre kojima se definiraju polarizacijske krivulje PEM elektrolizatora na početku i na kraju životnog vijeka.

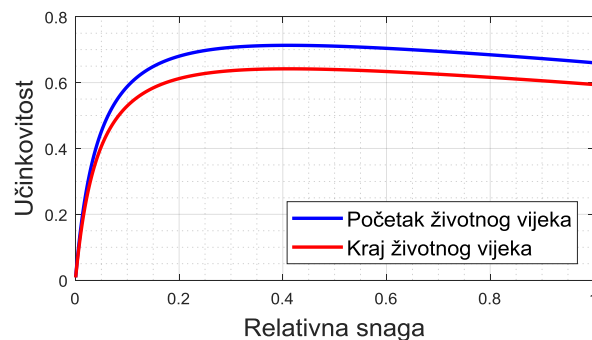


Tablica 3.7: Ključni parametri polarizacijske krivulje na početku i na kraju životnog vijeka članka PEM elektrolizatora

Parametar	Opis	BoL	EoL
$i_{loss}$	Gustoća struje parazitskih gubitaka, mA/cm <sup>2</sup>	2.00	2.00
$i_o$	Gustoća struje izmjene, mA/cm <sup>2</sup>	10 <sup>-3</sup>	2.543 · 10 <sup>-6</sup>
$i_L$	Gustoća struje ograničenja, mA/cm <sup>2</sup>	2500	2596
$R_{EL,i}$	Unutarnji otpor članka, Ω cm <sup>2</sup>	0.166	0.193



Slika 3.15: Radna karakteristika PEM elektrolizatora na početku i na kraju životnog vijeka



Slika 3.16: Krivulja učinkovitosti PEM elektrolizator uređaja u ovisnosti o relativnoj snazi na početku i na kraju životnog vijeka

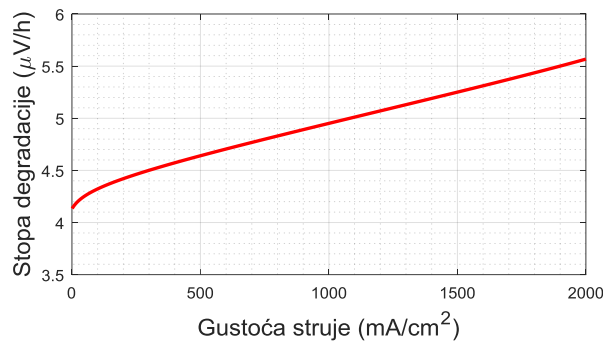
Prema usvojenim rubnim uvjetima je definirana stopa prirasta napona za nominalnu radnu točku od 5.57 μV po radnom satu elektrolizatora, odnosno 44.54 μV po ciklusu uključivanja i isključivanja. Prirast napona uslijed degradacije PEM elektrolizatora ( $\Delta U_{EL,deg}$ ) u ovisnosti o gustoći struje je definiran kao:

$$\Delta U_{EL,deg}(i) = \begin{cases} \frac{U_{EL,EoL}(i) - U_{EL,BoL}(i)}{n_{EL,S}^{EoL}} & \mu\text{V po radnom satu} \\ \frac{U_{EL,EoL}(i) - U_{EL,BoL}(i)}{n_{EL,C}^{EoL}} & \mu\text{V po ciklusu uključivanja i isključivanja} \end{cases} \quad (3.51)$$

gdje je  $U_{EL,EoL}$  napon članka elektrolizatora na kraju životnog vijeka za pripadajuću gustoću struje,  $U_{EL,BoL}$  je napon članka elektrolizatora na početku životnog vijeka za pripadajuću gustoću struje,  $n_{EL,S}^{EoL}$  je rubni uvjet ukupnog mogućeg broja radnih sati elektrolizatora do kraja životnog vijeka, a  $n_{EL,C}^{EoL}$  je rubni uvjet ukupnog mogućeg broja ciklusa uključivanja i isključivanja elektrolizatora do kraja životnog vijeka. Ukupan prirast napona za pripadajuću gustoću struje i razmatrani trenutak u vremenu je definiran kao:

$$\Delta U_{EL,deg}(t, i) = [U_{EL,EoL}(i) - U_{EL,BoL}(i)] \cdot \left[ \frac{1}{\sum_1^t n_{EL,S}(t)} + \frac{1}{\sum_1^t n_{EL,C}(t)} \right] \quad (3.52)$$

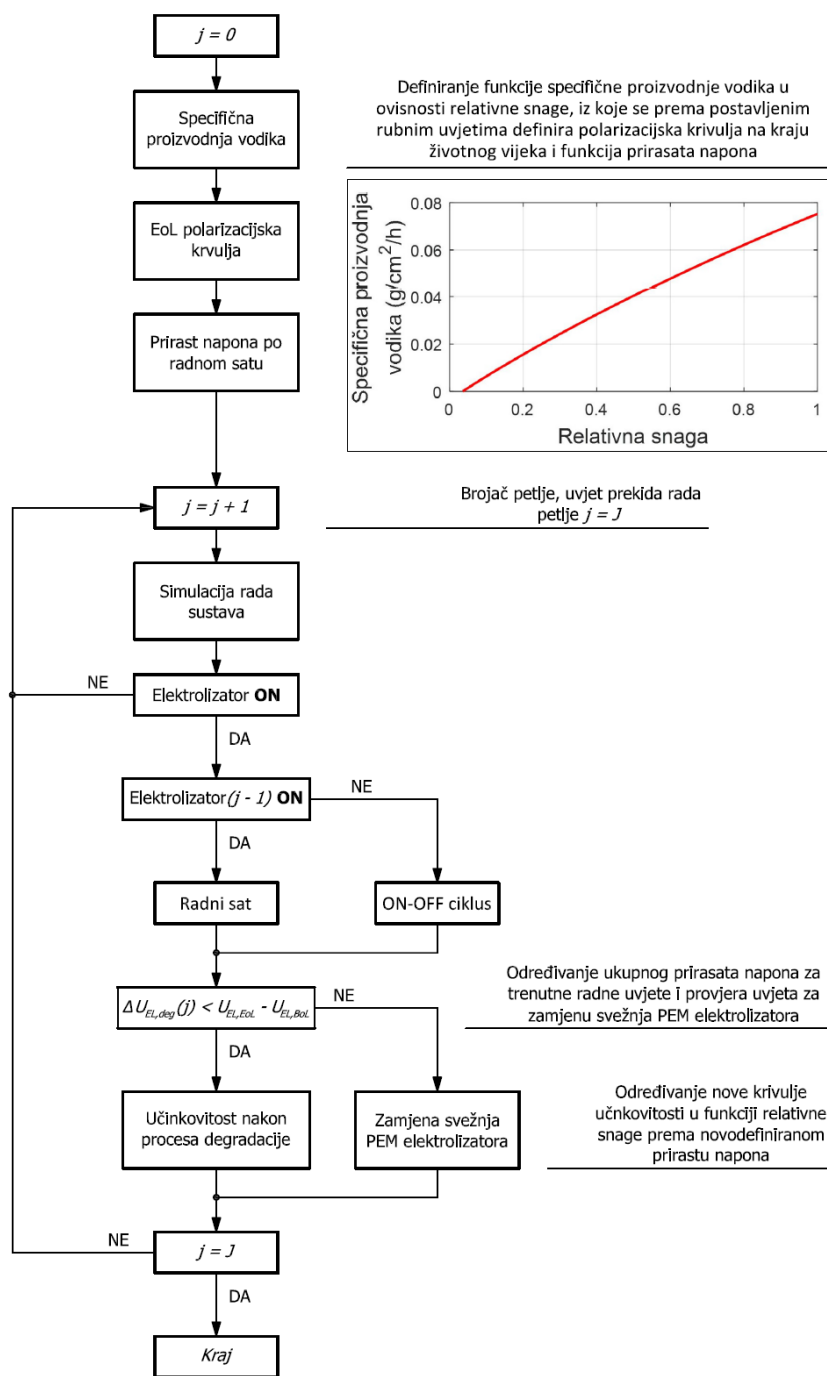
gdje je  $n_{EL,S}$  trenutni ukupan broj radnih sati elektrolizatora u razmatranom vremenu  $t$ , a  $n_{EL,C}$  trenutni ukupan broj ciklusa uključivanja i isključivanja elektrolizatora u razmatranom vremenu  $t$ . Slika 3.17 prikazuje prirast napona po radnom satu elektrolizatora u ovisnosti o gustoći struje.



Slika 3.17: Prirast napona uslijed degradacije PEM elektrolizatora u ovisnosti o gustoći struje

Slika 3.18 prikazuje dijagram toka logike procesa degradacije PEM elektrolizatora. Prema polarizacijskoj krivulji na početku životnog vijeka se definira funkcija specifične proizvodnje vodika. Prema rubnim uvjetima kojima se definira kraj životnog vijeka svežnja elektrolizatora se definira polarizacijska krivulja na kraju životnog vijeka i prirast napona po radnom satu elektrolizatora. Nakon svake nove iteracije rada HRES-a, provjerava se stanje rada elektrolizatora za trenutnu i prethodnu iteraciju, prema čemu se određuje prirast ukupnog broja radnih sati i broja ciklusa uključivanja i isključivanja. Prema trenutnim radnim uvjetima,

ukupnom broju radnih sati i broju ciklusa uključivanja i isključivanja se definira ukupan prirast napona (3.52), prema kojem se određuje novo trenutno stanje degradacije. Iz novog trenutnog stanja degradacije se zatim definira trenutna degradirana krivulja učinkovitosti, koja se koristi u sljedećoj iteraciji simulacije rada HRES-a. Trenutak zamjene svežnja PEM elektrolizatora se smatra trenutak jednom kad ukupan prirast napona bude jednak razlici napona članka elektrolizatora na kraju i na početku životnog vijeka, za pripadajuću struju.



Slika 3.18: Dijagram toka procesa degradacije PEM elektrolizatora

### 3.7. PEM gorivni članak

Radna karakteristika PEM FC-a je opisana polarizacijskom krivuljom, koja je definirana kao:

$$U_{FC} = U_{FC,t} - U_{FC,act} - U_{FC,ohm} - U_{FC,con} \quad (3.53)$$

gdje je  $U_{FC}$  napon FC članka pri nekoj struji,  $U_{FC,t}$  je teoretski FC napon,  $U_{FC,act}$  je napon aktivacijskih gubitaka,  $U_{FC,ohm}$  je ohmski gubitak, a  $U_{FC,con}$  je koncentracijski gubitak. Teoretski napon članka izravno ovisi o tlaku i temperaturi, a definiran je kao [18]:

$$U_{FC,t} = 1.482 - T_p [8.45 \cdot 10^{-4} + 4.31 \cdot 10^{-5} \ln(p_{H_2} p_{O_2}^{0.5})] \quad (3.54)$$

gdje je  $T_p$  temperatura procesa,  $p_{H_2}$  je parcijalni tlak vodika, a  $p_{O_2}$  je parcijalni tlak kisika.

Aktivacijski gubitci su definirani kao:

$$U_{FC,act} = b \log\left(\frac{i + i_{loss}}{i_o}\right) \quad (3.55)$$

gdje je  $b$  Tafelov broj (3.47),  $i$  je gustoća struje,  $i_o$  je gustoća struje izmjene, a  $i_{loss}$  je gustoća struje parazitskih gubitaka. U elektrokemijskim reakcijama, gustoća struje izmjene je analogna konstantnoj brzini kemijskih reakcija, te ovisi o koncentraciji i temperaturi [18]. Efektivna gustoća struje izmjene je funkcija specifične površine katalizatora, te je karakteristična za svaki pojedini članak. Nagib aktivacijskih gubitaka izravno ovisi o vrijednosti Tafelovog broja.

Ohmski gubitci su definirani kao:

$$U_{FC,ohm} = i R_{FC,i} \quad (3.56)$$

gdje je  $R_{FC,i}$  unutarnji otpor članka. Ohmski gubitci nastaju zbog otpora protoka iona u elektrolitu i otpora strujanja elektrona kroz električno vodljive dijelove FC-a [18].

Koncentracijski gubitci su definirani kao:

$$U_{FC,con} = \frac{RT_p}{nF} \ln\left(\frac{i_L}{i_L - i}\right) \quad (3.57)$$

gdje je  $R$  je univerzalna plinska konstanta,  $n$  je broj uključenih elektrona,  $F$  je Faradayeva konstanta, a  $i_L$  je gustoća struje ograničenja. Koncentracijski gubitci ovise o temperaturi i gustoći struje ograničenja. Gustoća struje ograničenja predstavlja struju pri kojoj se reaktant troši jednakom brzinom pri kojoj dolazi do površine katalizatora, te je kao rezultat koncentracija reaktanta i površine katalizatora jednaka nuli [18].

Učinkovitost FC uređaja proizlazi izravno iz FC polarizacijske krivulje i proporcionalna je umnošku naponske učinkovitosti i strujne učinkovitosti [18]. Strujna učinkovitost je određena unutrašnjim gubitcima struje i propuštanjem vodika. Međutim, ovi gubici postaju beznačajni pri većim gustoćama struje. Nadalje, pri određivanju učinkovitosti FC uređaja potrebno je razmatrati i parazitske gubitke snage iz pomoćne opreme FC uređaja, kao što su pumpe, ventilatori, upravljačke jedinice i učinkovitost DC/DC pretvarača. Zbog ovakvih parazitskih snaga pomoćne opreme, FC uređaj je manje učinkovit pri niskim radnim snagama, što može izravno utjecati na skraćivanje životnog vijeka FC svežnja [18]. Prema tome, rad FC uređaja će biti onemogućen u rasponu relativne snage od 0 do 10%. Učinkovitost FC uređaja ( $\eta_{FC}$ ) (*engl. FC system efficiency*), za gornju ogrjevnu moć vodika, je definirana kao [18, 105]:

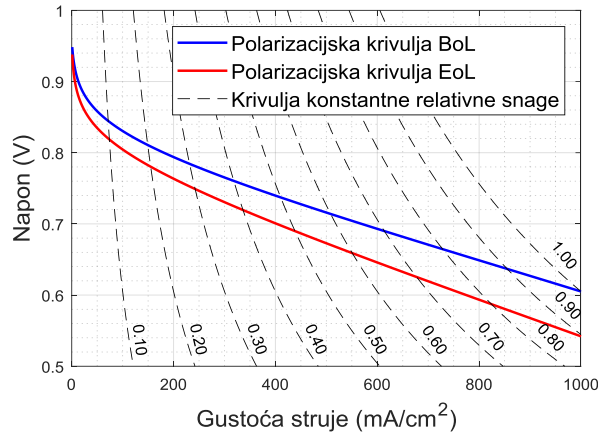
$$\eta_{FC} = \frac{U_{FC}}{1.482} \cdot \frac{i}{i - i_{loss}} (\eta_{DC} - r_{FC,p}) \quad (3.58)$$

gdje je  $r_{FC,p}$  omjer parazitske snage i bruto izlazne snage gorivnog članka.

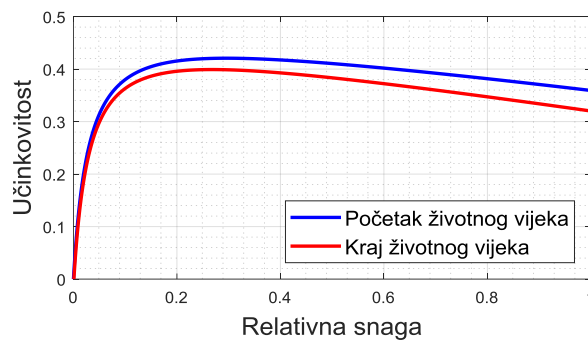
U literaturi je životni vijek PEM FC svežnja procijenjen na 30,000 h kontinuiranog rada [47], ili 10,000 ciklusa uključivanja i isključivanja [59]. Nadalje, kraj životnog vijeka PEM FC svežnja se smatra trenutak kad vrijednost napona nominalne radne točke padne na 90% vrijednosti na početku životnog vijeka [106]. Prema ovim usvojenim rubnim uvjetima je definirana polarizacijska krivulja na kraju životnog vijeka, slika 3.19, a prema polarizacijskoj krivulji na kraju životnog vijeka je definirana i krivulja učinkovitosti na kraju životnog vijeka u funkciji relativne snage, slika 3.20. Tablica 3.8 prikazuje ključne parametre kojima se definiraju PEM FC polarizacijska krivulje na početku i na kraju životnog vijeka.

Tablica 3.8: Ključni parametri PEM FC polarizacijske krivulje na početku i na kraju životnog vijeka

Parametar	Opis	BoL	EoL
$i_{loss}$	Gustoća struje parazitskih gubitaka, mA/cm <sup>2</sup>	2.00	2.00
$i_o$	Gustoća struje izmjene, mA/cm <sup>2</sup>	$6.3 \cdot 10^{-4}$	$3.03 \cdot 10^{-4}$
$i_L$	Gustoća struje ograničenja, mA/cm <sup>2</sup>	1800	1699
$R_{FC,i}$	Unutarnji otpor članaka, $\Omega$ cm <sup>2</sup>	0.150	0.206



Slika 3.19: Radna karakteristika PEM gorivnog članka na početku i na kraju životnog vijeka



Slika 3.20: Krivulja učinkovitosti PEM FC uređaja u ovisnosti o relativnoj snazi na početku i na kraju životnog vijeka

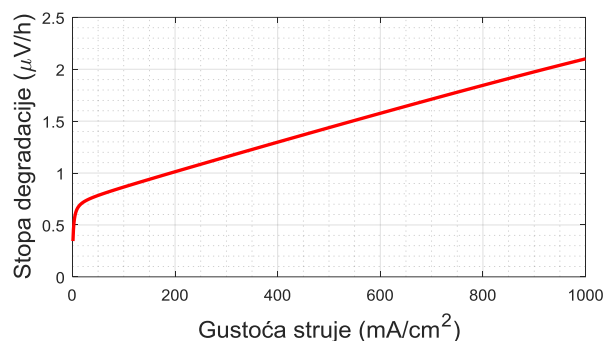
Prema dobivenim polarizacijskim krivuljama na početku i na kraju životnog vijeka je određena stopa degradacije u nazivnoj radnoj točki od  $2.1 \mu\text{V}$  po radnom satu i  $6.3 \mu\text{V}$  po ciklusu uključivanja i isključivanja. Stopa degradacije PEM FC-a ( $\Delta U_{FC,deg}$ ) u ovisnosti o gustoći struje je definiran kao:

$$\Delta U_{FC,deg}(i) = \begin{cases} \frac{U_{FC,BoL}(i) - U_{FC,EoL}(i)}{n_{FC,s}^{EoL}} & \mu\text{V po radnom satu} \\ \frac{U_{FC,BoL}(i) - U_{FC,EoL}(i)}{n_{FC,c}^{EoL}} & \mu\text{V po ciklusu uključivanja i isključivanja} \end{cases} \quad (3.59)$$

gdje je  $U_{FC,EoL}$  napon FC članka na kraju životnog vijeka za pripadajuću gustoću struje,  $U_{FC,BoL}$  je napon FC članka na početku životnog vijeka za pripadajuću gustoću struje,  $n_{FC,s}^{EoL}$  je rubni uvjet ukupnog mogućeg broja radnih sati FC-a do kraja životnog vijeka, a  $n_{FC,c}^{EoL}$  je rubni uvjet ukupnog mogućeg broja ciklusa uključivanja i isključivanja FC-a do kraja životnog vijeka. Ukupna stopa pada napona za pripadajuću gustoću struje i razmatrani trenutak u vremenu je definiran kao:

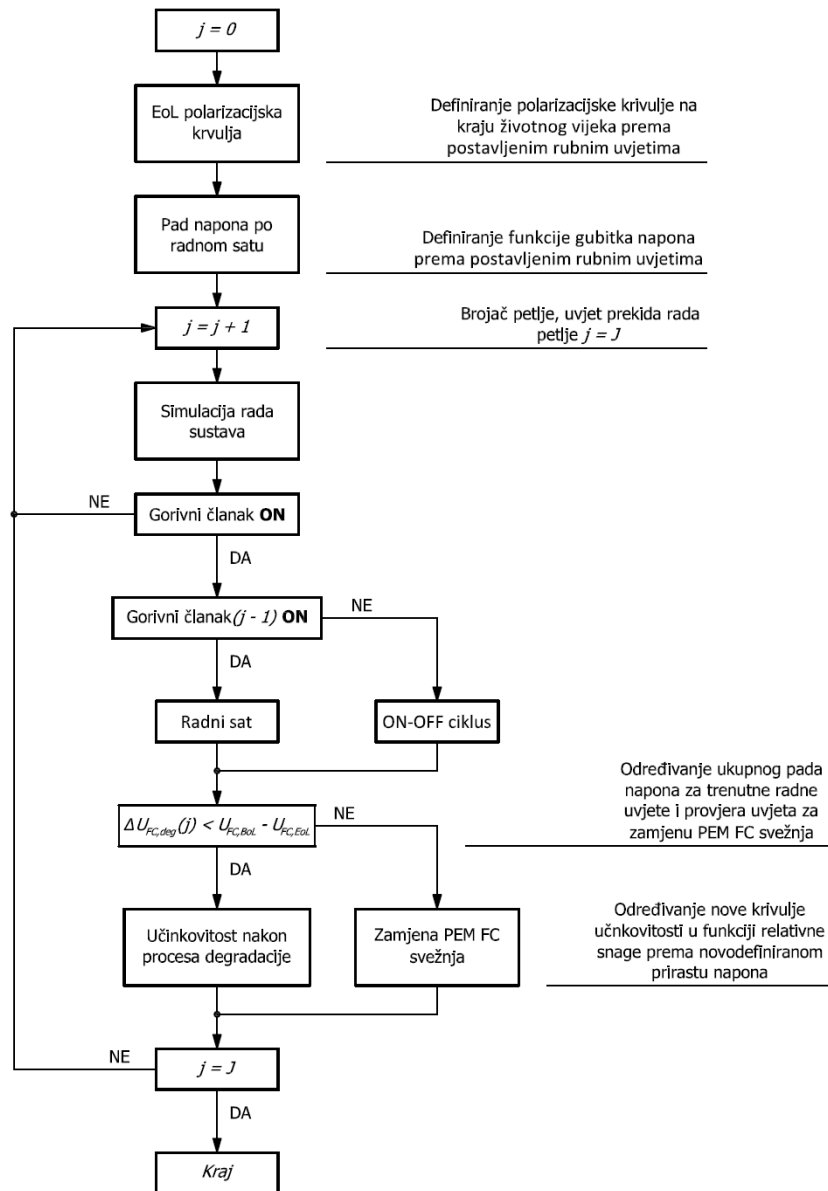
$$\Delta U_{FC,deg}(t, i) = [U_{FC,BoL}(i) - U_{FC,EoL}(i)] \cdot \left[ \frac{1}{\sum_1^t n_{FC,s}(t)} + \frac{1}{\sum_1^t n_{FC,c}(t)} \right] \quad (3.60)$$

gdje je  $n_{FC,s}$  trenutni ukupan broj radnih sati FC-a u razmatranom vremenu  $t$ , a  $n_{FC,c}$  trenutni ukupan broj ciklusa uključivanja i isključivanja FC-a u razmatranom vremenu  $t$ . Slika 3.21 prikazuje stopu degradacije po radnom satu FC-a u ovisnosti o gustoći struje.



Slika 3.21: Stopa degradacije PEM gorivnog članka u ovisnosti o gustoći struje

Slika 3.22 prikazuje dijagram toka logike procesa degradacije PEM FC-a. Prema rubnim uvjetima kojima se definira kraj životnog vijeka FC svežnja se definira polarizacijska krivulja na kraju životnog vijeka i stopa pada napona po radnom satu FC-a. Nakon svake nove iteracije rada HRES-a, provjerava se stanje rada FC-a za trenutnu i prethodnu iteraciju, prema čemu se određuje prirast ukupnog broja radnih sati i broja ciklusa uključivanja i isključivanja. Prema trenutnim radnim uvjetima, ukupnom broju radnih sati i broju ciklusa uključivanja i isključivanja se definira ukupan pad napona (3.60), prema kojem se određuje novo trenutno stanje degradacije. Iz novog trenutnog stanja degradacije se zatim definira trenutna degradirana krivulja učinkovitosti, koja se koristi u sljedećoj iteraciji simulacije rada HRES-a. Trenutak zamjene PEM FC svežnja se smatra trenutak jednom kad ukupan pad napona bude jednak razlici napona FC-a na početku i na kraju životnog vijeka, za pripadajuću struju.

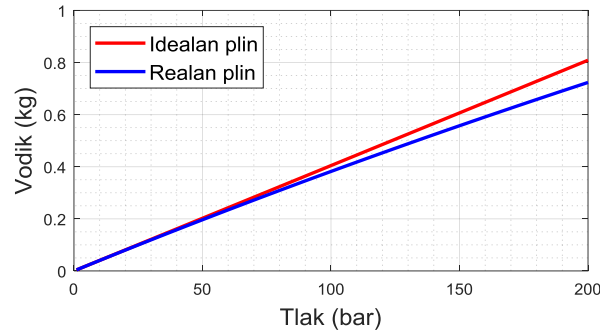


Slika 3.22: Dijagram toka procesa degradacije PEM FC-a

### 3.8. Spremnik vodika

Tlak koji odgovara trenutnoj masi skladištenog vodika u spremniku se može jednostavno odrediti prema jednadžbi stanja idealnog plina. Međutim, ako se skladištenje vodika izvodi pri tlakovima poviše 100 bar, vodik bi trebalo razmatrati kao realan plin [107], te bi se trebalo uzimati u obzir i koeficijent kompresibilnosti vodika. Na primjer, prema jednadžbi stanja idealnog plina, standardna industrijska čelična plinska boca od 50 litara pri taku od 200 bar sadrži 0.81 kg vodika, dok je u stvarnosti ta vrijednost mnogo bliža 0.72 kg, slika 3.23.



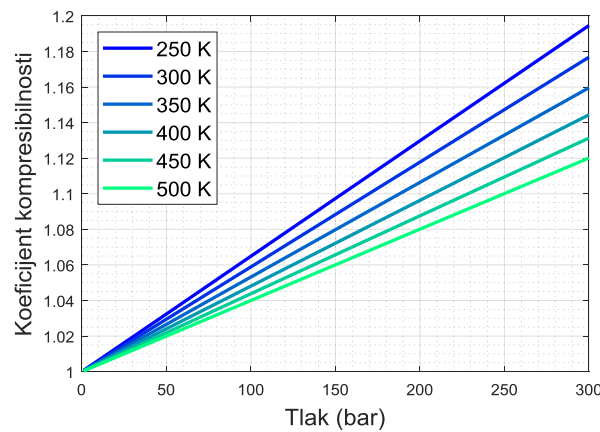


Slika 3.23: Razlika skladištenja idealnog i realnog vodika pod visokim tlakom u 50 litrenoj industrijskoj plinskoj boci

Trenutni tlak skladištenja vodika ( $p_{H_2}$ ) je definiran kao:

$$p_{H_2}(t) = m_{H_2}(t) \cdot \frac{R_{H_2} T_{H_2,s}}{V_{H_2,r}} \cdot z(p_{H_2}(t), T_{H_2,s}) \quad (3.61)$$

gdje je  $m_{H_2}$  je ukupna masa skladištenog vodika u razmatranom vremenu  $t$ ,  $R_{H_2}$  je plinska konstanta vodika,  $T_{H_2,s}$  je temperatura skladištenja vodika,  $V_{H_2,r}$  je nazivni volumen spremnika vodika, a  $z$  je koeficijent kompresibilnosti vodika za razmatrani trenutni tlak skladištenja i temperaturu skladištenja vodika. Slika 3.24 prikazuje koeficijent kompresibilnosti u ovisnosti o tlaku i temperaturi.



Slika 3.24: Koeficijent kompresibilnosti vodika u ovisnosti o tlaku i temperaturi

Ukupna masa skladištenog vodika je definirana kao:

$$m_{H_2}(t) = m_{H_2}(t - \Delta t) + \frac{P_{EL}(t) \cdot \eta_{EL}(P_{EL,rel}, t)}{HHV} - \frac{P_{FC}(t)}{HHV \cdot \eta_{FC}(P_{FC,rel}, t)} \quad (3.62)$$

gdje je  $P_{EL}$  snaga elektrolizatora u razmatranom vremenu  $t$ ,  $\eta_{EL}$  je učinkovitost elektrolizatora za razmatranu relativnu snagu elektrolizatora  $P_{EL,rel}$  i vremenski period  $t$ ,  $P_{FC}$  je FC snaga u

razmatranom vremenu  $t$ ,  $\eta_{FC}$  je FC učinkovitost za razmatranu relativnu FC snagu  $P_{FC,rel}$  i vremenski period  $t$ , a  $HHV$  je gornja ogrjevna moć vodika.

### 3.9. Višestupanjski klipni kompresor

Snaga višestupanjskog klipnog kompresora ( $P_c$ ) je definirana kao:

$$P_c = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \dot{m}_{H_2} R_{H_2} T_{H_2,s} \left[ \left( \sqrt[n_c]{\frac{p_{c,r}}{p_{c,ul}}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] \cdot \frac{n_c}{\eta_c} \sum_{cs} z_{cs} (p_{cs}, T_{H_2,s}) \quad (3.63)$$

gdje je  $\kappa$  omjer specifičnih toplinskih kapaciteta vodika,  $\dot{m}_{H_2}$  je maseni protok komprimiranog vodika,  $n_c$  je ukupan broj stupnjeva kompresije kompresora,  $p_{c,ul}$  je tlak kompresora na usisu,  $p_{c,r}$  je nazivni tlak kompresora,  $\eta_c$  je učinkovitost višestupanjskog kompresora, a  $z_{cs}$  je koeficijent kompresibilnosti vodika koji odgovara tlaku  $p_{cs}$  na kraju stupnja kompresije  $cs$ . Potreban broj stupnjeva kompresije kompresora je definiran kao:

$$n_c = \left\lceil \frac{\ln \left( \frac{p_{c,r}}{p_{c,ul}} \right)}{\ln \left[ \left( \frac{T_{c,x}}{T_{H_2,s}} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \right]} \right\rceil ; \quad n_c \in \{1,2,3 \dots 7\} \quad (3.64)$$

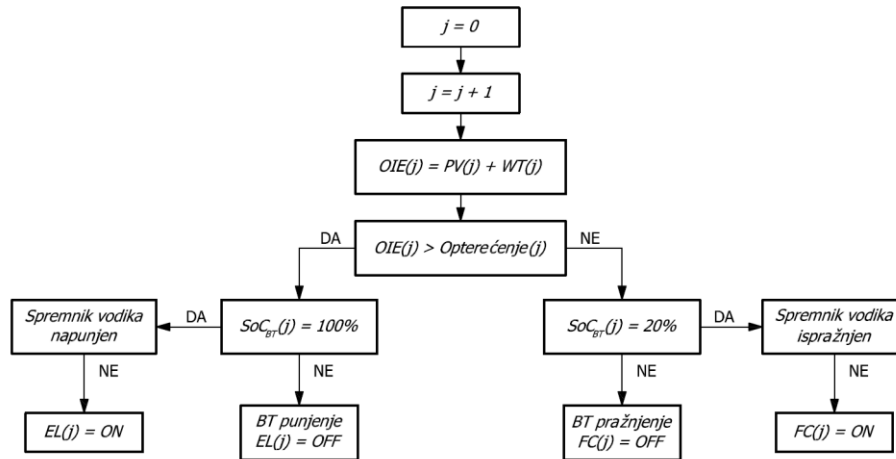
gdje je  $T_{c,x}$  ograničenje dopuštene temperature vodika na kraju procesa kompresije. Temperatura vodika na kraju procesa kompresije ne bi smjela prelaziti vrijednost od 160 °C, jer bi više temperaturne vrijednosti mogle nepovoljno utjecati na rad kompresora [108]. Vrijednost dopuštene temperature je određena empirijski prema komercijalno dostupnim višestupanjskim kompresorima vodika. Ukupan potreban broj stupnjeva kompresije se može smanjiti povećanjem tlaka na usisu kompresora, što se može ostvariti pomoću elektrolizatora. Međutim, kako bi se kompresoru omogućio neovisan rad o radu elektrolizatora, potrebno je korištenje međuspremnika između elektrolizatora i kompresora.

## 4. STRATEGIJA UPRAVLJANJA ENERGIJOM

U ovom poglavlju je izvršen pregled razmatranih strategija upravljanja energijom unutar HRES-a: strategija upravljanja energijom A (EMS-A); strategija upravljanja energijom B (EMS-B).

### 4.1. Strategija upravljanja energijom na temelju energetske bilance

EMS-A se temelji na energetske bilanci unutar HRES-a. Slika 4.1 prikazuje EMS-A dijagram toka logike upravljanja. Opterećenje krajnjeg korisnika prvo pokušava zadovoljiti svoje energetske potrebe izravno iz OIE, jer je to najučinkovitiji tok energije i stoga ima prvi stupanj prioriteta. Ako proizvodnje energije iz OIE premašuje potrebe opterećenja krajnjeg korisnika, višak energije će biti preusmjeren na punjenje baterije. Kada, ili ako, je baterija potpuno napunjena, preostali višak energije će biti iskorišten za proizvodnju vodika korištenjem PEM elektrolizatora. Jednom kada bude uključen, elektrolizator će raditi u režimu rada promjenjive snage, koji će izravno ovisiti o proizvodnom profilu OIE. Elektrolizator će ostati uključen sve dok postoji višak proizvedene energije i dok je baterija potpuno napunjena ili dok trenutni tlak spremnika vodika ne dosegne vrijednost nazivnog tlaka spremnika. Međutim, ako je energija proizvedena iz OIE nedostatna za zadovoljavanje energetske potreba opterećenja krajnjeg korisnika, energija iz baterije će se koristiti za kompenzaciju energetske razlike. Pošto je baterija učinkovitiji oblik skladištenja energije, u odnosu na vodikov podsustav, baterija je postavljena kao energetski tok drugog stupnja prioriteta unutar razmatranog HRES-a. Ako je energija proizvedena iz OIE nedostatna, a  $SoC_{BT}$  je na razini sigurnosne granice  $SoC_{BT}$ , FC će se uključiti i iskoristiti pohranjeni vodik za proizvodnju električne energije kako bi se zadovoljile potrebe opterećenja krajnjeg korisnika. FC će raditi u režimu rada promjenjive snage, koja će izravno ovisiti o razlici između profila proizvedene energije i profila opterećenja krajnjeg korisnika. Nadalje, FC će ostati uključen sve dok je proizvodnja energije iz OIE nedostatna ili dok trenutni tlak spremnika vodika ne padne na vrijednost tlaka praznog spremnika.



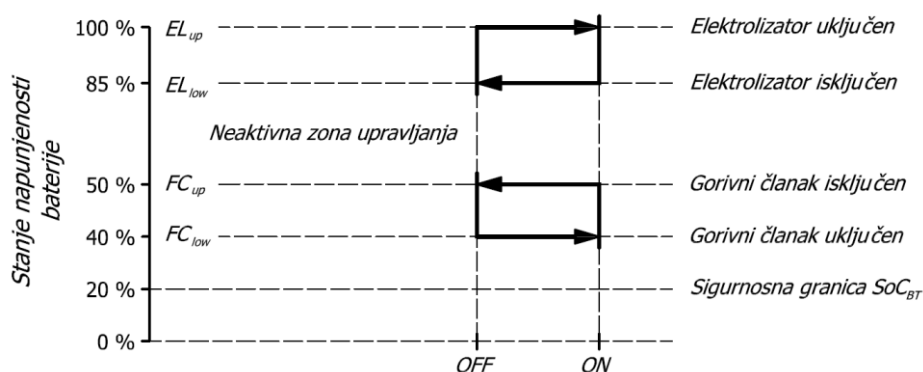
Slika 4.1: Dijagram toka logike upravljanja EMS-A

## 4.2. Strategija upravljanja energijom bazirana na logici petlje dvostruke histereze

Kao i kod EMS-A, opterećenje krajnjeg korisnika će prvo pokušati zadovoljiti svoje energetske potrebe izravno iz energije proizvedene iz OIE. Međutim, od toga trenutka pa nadalje, logika EMS-B se bazira na upravljanju uključivanja i isključivanja FC-a i elektrolizatora prema petljama dvostruke histereze, gdje je  $SoC_{BT}$  glavni parametar upravljanja [32, 33], slika 4.2. Parametri upravljanja su: stanje napunjenosti baterije za uključivanje elektrolizatora ( $EL_{up}$ ); stanje napunjenosti baterije za isključivanje elektrolizatora ( $EL_{low}$ ); stanje napunjenosti baterije za uključivanje gorivnog članka ( $FC_{low}$ ); stanje napunjenosti baterije za isključivanje gorivnog članka ( $FC_{up}$ ). Iz dijagrama dvostrukih histereza se može vidjeti da će aktivna dubina pražnjenja baterije izravno ovisiti o  $EL_{up}$  i  $FC_{low}$  parametrima upravljanja, iako je bateriji dozvoljeno da aktivno koristi kapacitet sve do  $SoC_{BT}$  postavljene sigurnosne granice. Vrijednosti parametra upravljanja će biti postavljene:  $EL_{up}$  na 100%  $SoC_{BT}$ ;  $EL_{low}$  na 85%  $SoC_{BT}$ ;  $FC_{up}$  na 50%  $SoC_{BT}$ ;  $FC_{low}$  na 40%  $SoC_{BT}$ . Postavljanjem  $FC_{low}$  na 40%  $SoC_{BT}$  se pruža dodatna zaštita bateriji od ciklusa dubokih pražnjenja. Nadalje, postavljanjem  $EL_{up}$  na 100%  $SoC_{BT}$  se izbjegava akumulacija loših punjenja baterije (3.30) [65, 66].

Za EMS-B, elektrolizator će imati dva moguća režima rada: režim rada promjenjive snage; režim rada konstantne snage. Režim rada elektrolizatora će biti odabran prema  $SoC_{BT}$  i prema energetskoj razlici između profila proizvedene energije i profila opterećenja krajnjeg korisnika. Jednom kada je elektrolizator uključen, a  $SoC_{BT}$  je između  $EL_{up}$  i  $EL_{low}$ , elektrolizator će raditi

u režimu rada konstantne snage, definiranom točkom maksimalne učinkovitosti. Točka maksimalne učinkovitosti se ostvaruje radom elektrolizatora pri 40% relativne snage. Ako je energetska razlika između proizvedene energije i energetske potreba opterećenja krajnjeg korisnika nedovoljna da bi elektrolizator radio s 40% relativne snage, energetski deficit će biti kompenziran iz baterije. Nadalje, ako energetska razlika između proizvedene energije i energetske potreba opterećenja krajnjeg korisnika premašuju potrebe elektrolizatora za rad na 40% relativne snage, preostali višak energije će biti iskorišten za punjenje baterije. Elektrolizator će raditi režimom rada promjenjive snage samo dok je baterije potpuno napunjena. U slučaju kada je energetska razlika između proizvedene energije i energetske potreba opterećenja krajnjeg korisnika negativna, a  $SoC_{BT}$  je između  $EL_{up}$  i  $EL_{low}$  i elektrolizator je već uključen, baterija će zadovoljiti potrebe opterećenja krajnjeg korisnika i održati neometan rad elektrolizatora u točki maksimalne učinkovitosti. Postavljanjem mogućnosti da baterija održava neometan rad elektrolizatora će se potencijalno utjecati na smanjenje ukupnog broja ciklusa uključivanja i isključivanja elektrolizatora, što će izravno utjecati na dinamiku gubitka kapaciteta elektrolizatora.



Slika 4.2: Petlje upravljanja dvostruke histereze

Za razliku od elektrolizatora, FC će biti u mogućnosti raditi samo u režimu rada nazivne snage. Ako je  $SoC_{BT}$  između  $FC_{up}$  i  $FC_{low}$ , a FC je uključen, bateriji će biti onemogućeno pražnjenje, te će joj biti omogućeno samo punjenje. Nadalje, bez obzira ako je energetska razlika između proizvedene energije i energetske potreba opterećenja krajnjeg korisnika pozitivna ili negativna i sve dok su potrebe opterećenja krajnjeg korisnika potpuno zadovoljene, FC će biti korišten za punjenje baterije sve dok  $SoC_{BT}$  ne dosegne  $FC_{up}$ . Slika 4.3 prikazuje EMS-B dijagram toka logike upravljanja.



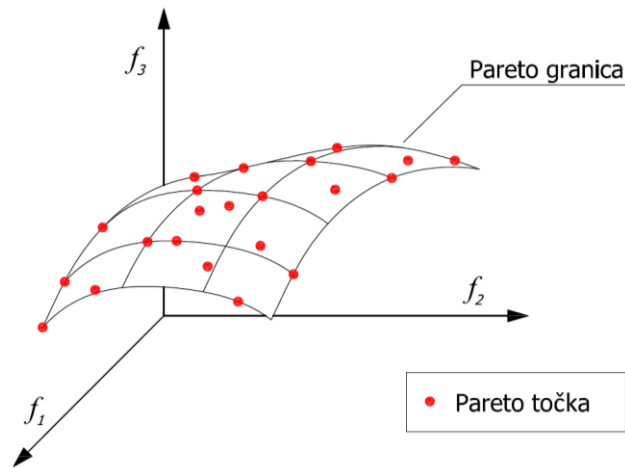
## 5. DIMENZIONIRANJE SUSTAVA

U ovom poglavlju je prikazana metoda dimenzioniranja razmatrane HRES konfiguracije, gdje su prikazani rubni uvjeti i ograničenja višeciljne optimizacije. Nadalje, prikazane su i detaljno objašnjene tri funkcije cilja, prema kojima je izvršeno dimenzioniranje sustava.

Višeciljna optimizacija je slučaj optimizacije kada je postavljeno više kriterija po kojima se vrednuje optimalno rješenje koji pojedinačno nemaju zajedničko optimalno rješenje u istoj točki [109–112]. u takvim slučajevima je potrebno postaviti uvjete za dobivanje najboljeg kompromisnog rješenja, koje će zadovoljavati sve postavljene uvjete. Postoje dva pristupa rješavanja ovog problema: normalizacija funkcija cilja u objedinjenu funkciju cilja; Pareto granica optimalnih rješenja.

Objedinjivanje normaliziranih funkcija cilja u jednu funkciju cilja je moguće izvršiti pomoću težinskih faktora, kojima se opisuje relativan prioritet svake od razmatranih funkcija cilja [109–112]. Ova metoda omogućava da se prema objedinjenoj funkciji cilja i postavljenim težinskim faktorima dobije jedno rješenje optimizacije. Međutim, nedostatak ove metode je problem postavljanja vrijednosti težinskih faktora zbog kontradiktorne prirode razmatranih funkcija cilja. Ova metoda višeciljne optimizacije je korištena u [6].

Metoda Pareto-optimalnosti za postavljene funkcije cilja daje skup ne-dominiranih rješenja, ili Pareto točaka, koja zadovoljavaju sve kriterije postavljenih funkcija cilja [109–112]. Skup dobivenih ne-dominiranih rješenja tvori Pareto granicu. Nakon što se dobije skup optimalnih rješenja, moguće je izabrati jedno rješenje na temelju raznih kompromisa postavljenih nakon procesa optimizacije, ali da nisu težinski faktori [110]. Slika 5.1 prikazuje koncept Pareto granice višeciljne optimizacije prema tri funkcije cilja. Metoda Pareto-optimalnosti je korištena u [70].



Slika 5.1: Koncept Pareto granice višeciljne optimizacije prema tri funkcije cilja

### 5.1. Varijable optimizacije i ograničenja

Varijable optimizacije predstavljaju slobodne veličine predodređenog raspona pretraživanja, koje se određuju procesom optimizacije prema postavljenim kriterijima [112]. Raspon pretraživanja vrijednosti varijabli optimizacije je određen rubnim uvjetima kako bi se izostavile nerealne i nepoželjne vrijednosti, te se na taj način poboljšalo vrijeme optimizacije. Varijable optimizacije su izvedene iz razmatranih matematičkih modela komponenata HRES-a. Razmatrane varijable optimizacije s pripadajućim rubnim uvjetima su prikazane u tablici 5.1.

Gornja granica nazivne snage PV modula (5.1) i vjetroturbine (5.2) je definirana prosječnom snagom opterećenja ( $P_{L,a}$ ) i faktorom iskorištenja kapaciteta PV modula, odnosno vjetroturbine. Vrijednost gornje granice rubnog uvjeta je uvećana za vrijednost marginalnog koeficijenta pretraživanja ( $k_m$ ), kojim se osigurava dostatan raspon pretraživanja. U svrhu ovog istraživanja, usvojena vrijednost marginalnog koeficijenta pretraživanja je 10. Donja granica rubnog uvjeta nazivne snage PV modula i vjetroturbine je postavljena 0, kao bi se ostavila mogućnost postojanja optimalnog rješenja konfiguracije bez PV modula ili vjetroturbine.

Kapaciteti spremnika energije, baterija i spremnik vodika, su definirani srednjim snagom opterećenja i aktivnom dubinom pražnjenja pripadajućeg spremnika. Pošto se baterija smatra kratkoročnim oblikom skladištenja energije, vrijednost donje granice kapaciteta baterije je određena za potrebe zadovoljavanja srednje snage opterećenja u trajanju od 24 sata (5.3). Donja granica vrijednosti kapaciteta spremnika vodika je definirana za potrebe zadovoljavanja srednje



snage opterećenja u trajanju od 7 dana (5.9). Gornje granice vrijednosti kapaciteta spremnika energije su uvećanje marginalnim koeficijentom pretraživanja na 10 dana za bateriju (5.4), odnosno 10 tjedana za spremnik vodika (5.10).

Potrebni kapaciteti elektrolizatora i FC-a će izravno ovisiti o vrijednostima razlike snage između proizvodnog kapaciteta i snage opterećenja krajnjeg korisnika. Međutim, vrijednosti razlike snage između proizvodnog kapaciteta i snage opterećenja krajnjeg korisnika nije moguće odrediti bez poznavanja vrijednosti nazivnih snaga PV modula i vjetroturbine. Prema tome, pošto su rubni uvjeti nazivne snage PV modula i vjetroturbine definirani prema srednjoj snazi opterećenja krajnjeg korisnika, rubni uvjeti pretraživanja nazivne snage elektrolizatora i FC-a su također definirani srednjom snagom opterećenja krajnjeg korisnika.

Tablica 5.1: Varijable optimizacije i rubni uvjeti pretraživanja

Varijabla optimizacije	Opis	Rubni uvjeti
$P_{PV,r}$	Nazivna snaga PV modula, (W)	$\geq 0$ $\leq \frac{P_{L,a}}{\frac{\sum_{t=1}^J E_{\beta}(t)}{J \cdot E_{st}}} \cdot k_m \quad ; \quad \beta = 45^{\circ}$ (5.1)
$P_{WT,r}$	Nazivna snaga vjetroturbine, (W)	$\geq 0$ $\leq \frac{P_{L,a}}{\frac{\sum_{t=1}^J P_{WT,rel}(v(t,y))}{J}} \cdot k_m \quad ; \quad y = 15 \text{ m}$ (5.2)
$C_{BT,r}$	Nazivni kapacitet baterije, (Wh)	$\geq \frac{P_{L,a} \cdot 24[\text{h}]}{\eta_{BT} \cdot DoD_{BT}}$ (5.3)
		$\leq \frac{P_{L,a} \cdot 24[\text{h}]}{\eta_{BT} \cdot DoD_{BT}} \cdot k_m$ (5.4)
$P_{EL,r}$	Nazivna snaga elektrolizatora, (W)	$\leq P_{L,a}$ $\leq P_{L,a} \cdot k_m$ (5.5)
$P_{FC,r}$	Nazivna snaga FC-a, (W)	$\geq P_{L,a}$ $\leq P_{L,a} \cdot k_m$ (5.5)
$V_{H_2,r}$	Nazivni volumen spremnika, (m <sup>3</sup> )	$\geq \frac{R_{H_2} \cdot T_{H_2,s}}{p_{H_2,r}} \cdot z(p_{H_2,r}, T_{H_2,s}) \cdot \frac{P_{L,a} \cdot 24 [\text{h}] \cdot 7 [\text{dan}]}{HHV \cdot \eta_{FC}(p_{FC,r}^{BoL}) \cdot \left(\frac{p_{H_2,r} - p_{H_2}^{emp}}{p_{H_2,r}}\right)}$ (5.6)
		$\leq \frac{R_{H_2} \cdot T_{H_2,s}}{p_{H_2,r}} \cdot z(p_{H_2,r}, T_{H_2,s}) \cdot \frac{P_{L,a} \cdot 24 [\text{h}] \cdot 7 [\text{dan}] \cdot k_m}{HHV \cdot \eta_{FC}(p_{FC,r}^{BoL}) \cdot \left(\frac{p_{H_2,r} - p_{H_2}^{emp}}{p_{H_2,r}}\right)}$ (5.7)
$\beta$	Kut nagiba PV modula	$\geq 0^{\circ}$ $\leq 90^{\circ}$
$y$	Visina stupa vjetroturbine, (m)	$\geq 10$ $\leq 25$

Osim rubnih uvjeta pretraživanja varijabli, postavljena su i ograničenja optimizacije. Prvo ograničenje ( $g_1$ ) je definirano faktorom zadovoljavanja potreba krajnjeg korisnika (*engl. Loss of Power Probability, LoPP*), gdje za ograničenje postavljen uvjet jednakosti. Faktor zadovoljavanja potreba krajnjeg korisnika je definiran kao:

$$LoPP = \frac{\sum_t \left| \frac{1}{2} [(P_{PV} + P_{WT} + P_{BT} + P_{FC} - P_L) - |P_{PV} + P_{WT} + P_{BT} + P_{FC} - P_L|] \right| \Delta t}{\sum_t P_L(t) \Delta t} \quad (5.8)$$

a ograničenje kao:

$$g_1(LoPP) = 0 \quad (5.9)$$

Za razmatranu EMS-A, vodikov podsustav služi kao zadnja opcija izvora energije u slučaju energetskeg deficita. Međutim, kod EMS-A su mogući scenariji u kojima se od FC-a očekuje da zadovolji potrebe opterećenja krajnjeg korisnika, ali zbog postavljenih rubnih uvjeta rada FC to neće biti moguće, iako u spremniku vodika ima dovoljno vodika da se u tom trenutku zadovolje potrebe opterećenja. Što je veći razmatrani vremenski period rada sustava to je i manja vjerojatnost da se takvog scenarija neće doći. Uvjete postavljenog ograničenja  $g_1 = 0$  bi se u tom slučaju najjednostavnije ispunilo predimenzioniranjem baterije i potpunim izdvajanjem vodikovog podsustava iz razmatrane HRES konfiguracije. Prema tome, kako bi se izbjeglo favoriziranje baterije prilikom procesa optimizacije zbog postavljenog ograničenja  $g_1 = 0$ , za sve razmatrane EMS-A slučajeve je postavljena tolerancija na *LoPP* od 0.1%, pa prvo ograničenje za EMS-A slučajeve poprima oblik  $g_1 < 0.1\%$ .

Drugo ograničenje ( $g_2$ ) je definirano razlikom ukupne proizvedene energije i ukupne energije opterećenja krajnjeg korisnika, čime se osigurava da ukupna proizvedena energija ne može biti manja od energetske potrebe opterećenja. Energetska razlika proizvedene energije i energetske potrebe opterećenja ( $\Delta E_{dif}$ ) je definirana kao:

$$\Delta E_{dif} = \sum_t [P_{PV}(t) + P_{WT}(t) - P_L(t)] \Delta t \quad (5.10)$$

a ograničenje kao:

$$g_2(\Delta E_{dif}) > 0 \quad (5.11)$$

## 5.2. Funkcije cilja

Funkcijom cilja se osigurava mjerilo prema kojem se određuje koliko su dobivena rješenja dobra za domenu zadanog problema. U slučajevima kada se traži minimum za zadani problem, najbolje ocijenjeno rješenje će biti ono najniže vrijednosti koja se povezuje s funkcijom cilja [113].

Pregledom literature je zaključeno da većina dostupnih istraživanja provodi optimizaciju nekog oblika HRES-a prema ekonomskoj funkciji cilja, gdje se najčešće traži minimum neto troška sustava ili minimum cijene energije. Druga najčešće razmatrana funkcija cilja je tehnno-ekonomska funkcija cilja, gdje se uz već navedene ekonomske funkcije cilja razmatra i tehnička funkcije cilja najčešće definirana preko mogućnosti sustava da zadovolji energetske potrebe opterećenja krajnjeg korisnika. U ovom istraživanju su razmatrane tri funkcije cilja: energetska učinkovitost sustava; pouzdanost sustava; normalizirana cijena korisne energije.

### 5.2.1. Učinkovitost sustava

Prva tehnička funkcija cilja je definirana energetsom učinkovitošću HRES-a. Energetska učinkovitost sustava ( $\eta_s$ ) je definirana kao omjer ukupne energije dostavljene opterećenju krajnjeg korisnika i ukupne ulazne energije u sustav:

$$\eta_s = \frac{(1 - LoPP) \cdot \sum_t P_L(t) \Delta t}{\sum_t [P_{PV}(t) + P_{WT}(t)] \Delta t + E_{BT}^{in} + E_{H_2}^{in}} \quad (5.12)$$

gdje je  $P_{PV}$  izlazna snaga PV modula u trenutku  $t$ ,  $P_{WT}$  je izlazna snaga vjetroturbine u trenutku  $t$ ,  $\Delta t$  je prirast vremena,  $E_{BT}^{in}$  je ukupna inicijalna energija kojom baterija doprinosi u sustav na početku životnog vijeka, a  $E_{H_2}^{in}$  je inicijalna energetska vrijednost vodika na početku razmatranog vremenskog perioda.

Inicijalna energija kojom svaka baterija doprinosi na početku svog životnog vijeka je definirana nazivnim kapacitetom baterije ( $C_{BT,r}$ ) i aktivnom dubinom pražnjenja baterije ( $DoD_{BT}$ ). Ukupna inicijalna energija baterije je definirana kao:

$$E_{BT}^{in} = C_{BT,r} \cdot DoD_{BT} \cdot n_{BT}^{rep} \quad (5.13)$$

gdje je  $n_{BT}^{rep}$  ukupan broj zamjena baterije. Svakom zamjenom baterije se smatra da je svaka nova baterija na početku životnog vijeka potpuno napunjena. Prema tome, većim brojem zamjena baterije se također utječe i na učinkovitost sustava. Aktivna dubina pražnjenja baterije

je za EMS-A definirana postavljenom vrijednošću sigurnosne granice  $SoC_{BT}$ , dok je za slučaj EMS-B aktivna dubina pražnjenja baterije definirana parametrima upravljanja  $EL_{up}$  i  $FC_{low}$ .

Inicijalna energetska vrijednost vodika na početku razmatranog vremenskog perioda je definirana kao:

$$E_{H_2}^{in} = [p_{H_2}^{in} \cdot z(p_{H_2}^{in}, T_{H_2,s}) - p_{H_2}^{emp} \cdot z(p_{H_2}^{emp}, T_{H_2,s})] \cdot \frac{HHV \cdot V_{H_2,r}}{R_{H_2} \cdot T_{H_2,s}} \quad (5.14)$$

gdje je  $p_{H_2}^{in}$  inicijalan tlak spremnika vodika,  $p_{H_2}^{emp}$  je tlak praznog spremnika vodika,  $z$  je koeficijent kompresibilnosti vodika,  $T_{H_2,s}$  je temperatura skladištenja vodika,  $R_{H_2}$  je plinska konstanta vodika,  $V_{H_2,r}$  je nazivni volumen spremnika vodika, a  $HHV$  je gornja ogrjevna moć vodika.

Funkcija cilja ( $f_1$ ) je definirana kao recipročna vrijednost učinkovitosti sustava i definirana je kao:

$$f_1 = \min\left(\frac{1}{\eta_s}\right) \quad (5.15)$$

### 5.2.2. Pouzdanost

Druga tehnička funkcija cilja je definirana pouzdanošću HRES-a. Pouzdanost nekog sustava ili komponente sustava se definira kao mogućnost sustava ili komponente sustava da izvrši zadani zadatak kroz razmatrani vremenski period pri određenim uvjetima rada. U poglavlju 3, modeliranje komponenata samostalnog hibridnog energetskog sustava, olovno-kiselinska baterije, PEM elektrolizator i PEM FC su prepoznati kao komponente razmatranog sustava za koje režim rada sustava izravno utječe na dinamiku gubitka kapaciteta i životni vijek, a samim time i pouzdanost. PV moduli su također komponenta sustava za koju je prepoznat gubitak kapaciteta u vremenu. Međutim, za razliku od baterije, elektrolizatora i FC-a, režim rada HRES-a ne utječe na dinamiku gubitka kapaciteta PV modula, već je gubitak kapaciteta PV modula prepoznat kao funkcija vremena. Pouzdanost sustava kao normalizirana funkcija cilja optimizacije s dodijeljenim težinskim faktorom, definirana životnim vijekom komponenata sustava, je primijenjena u [6]. Autori u [70] također koriste pouzdanost sustava definiranu životnim vijekom komponenata kao jednu od funkcija cilja za dobivanje Pareto granice optimalnih rješenja.

Osnovni cilj vrednovanja razine pouzdanosti u ovom istraživanju nije određivanje mogućnosti pojedine komponente sustava za izvršavanje postavljenog zadatka, već određivanje relativne vrijednosti utjecaja dinamike gubitka kapaciteta pojedine komponente na performanse sustava. Prema tome, pouzdanost je u ovom slučaju definirana kao kvantifikacija dinamike gubitka kapaciteta pojedine komponente pri razmatranim radnim uvjetima.

Relativna pouzdanost pojedine komponente sustava (*engl. Relative Reliability of Component, RRC*) je definirana kao eksponencijalna funkcija prosječnog gubitka kapaciteta komponente:

$$RRC_{n_p} = \begin{cases} \exp \left[ \frac{\left(1 - \frac{C_{n_p}^{EoL}}{C_{n_p}^{BoL}}\right) \cdot 100\%}{\bar{L}_{n_p}} \right] & ; \quad \forall n_{n_p}^{rep} > 0 \\ \exp \left[ \frac{\left(1 - \frac{C_{n_p}^{ng}}{C_{n_p}^{BoL}}\right) \cdot 100\%}{n_g} \right] & ; \quad n_{n_p}^{rep} = 0 \end{cases} \quad (5.16)$$

gdje je  $C_{n_p}^{BoL}$  kapacitet komponente  $n_p$  na početku životnog vijeka,  $C_{n_p}^{EoL}$  je kapacitet komponente  $n_p$  na kraju životnog vijeka,  $C_{n_p}^{ng}$  je kapacitet komponente  $n_p$  na kraju razmatranog vremenskog perioda,  $\bar{L}_{n_p}$  je prosječni životni vijek komponente  $n_p$ ,  $n_{n_p}^{rep}$  je broj zamjena komponente  $n_p$ , a  $n_g$  je broj godina razmatranog vremenskog perioda. Ukupna pouzdanost sustava (*engl. System Reliability, SR*) je definirana kao:

$$SR = \prod_{n_p} RRC_{n_p} \quad (5.17)$$

Funkcija cilja pouzdanosti sustava ( $f_2$ ) je definirana kao:

$$f_2 = \min \left( \frac{1}{SR} \right) \quad (5.18)$$

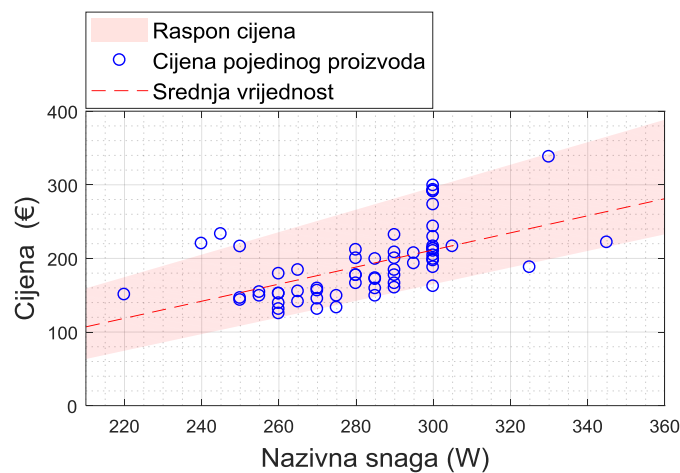
### 5.2.3. Cijena energije

Ekonomska funkcija cilja je definirana normaliziranom cijenom korisne energije (*engl. Levelized Cost of Energy, LCOE*), koja obuhvaća godišnje troškove životnog ciklusa (*engl. Annualized Life Cycle Cost, ALC*) HRES-a po prosječnoj godišnjoj energiji iskorištenoj za zadovoljavanje potreba opterećenja krajnjeg korisnika. Godišnji troškovi životnog ciklusa

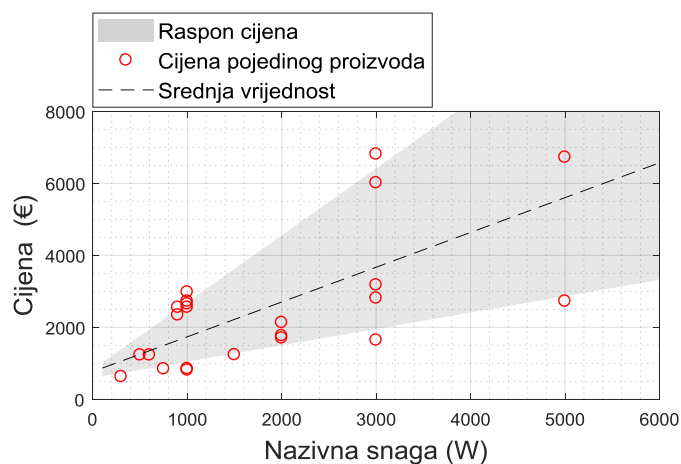
obuhvaćaju ukupne inicijalne kapitalne troškove (*engl. Initial Capital Cost, ICC*), godišnje troškove rada i održavanja (*engl. Operation and Maintenance, OM*), kapitalne troškove zamjene komponenta ili dijelova komponenta na kraju životnog vijeka razmatrane komponente (*engl. Replacement Cost, RC*) i povrat sredstava na kraju razmatranog vremenskog perioda (*engl. System Salvage Price, SSP*). Godišnji troškovi životnog ciklusa su definirani kao:

$$ALC = (ICC + RC - SSP) \cdot CRF + OM \quad (5.19)$$

gdje je *CRF* faktor povrata kapitala (*engl. Capital Recovery Factor*). Inicijalni kapitalni troškovi obuhvaćaju cijenu pojedine komponente razmatrane HRES konfiguracije, troškove ugradnje i troškove transporta. Slika 5.2 i 5.3 prikazuju raspon cijene PV modula, odnosno vjetroturbine u ovisnosti o nazivnoj snazi, a tablica 5.2 prikazuje sve ostale HRES ekonomske parametre.



Slika 5.2: Prikaz raspona cijene PV modula



Slika 5.3: Prikaz raspona cijene vjetroturbine

Tablica 5.2: Pregled ekonomskih parametara

Komponenta	Opis troška		Literatura	
PV modul	Nosiva konstrukcija	325 € kW <sup>-1</sup>	[2]	
	Ugradnja	325 € kW <sup>-1</sup>	[2]	
	Naponski pretvarač	400 € kW <sup>-1</sup>	[2]	
	Troškovi održavanja	10 € kW <sup>-1</sup> godišnje	[2], [14]	
	Životni vijek	25 godina	[14]	
Vjetroturbina	Toranj	Više od 2 kW	215 € m <sup>-1</sup>	[16]
		Manje od 2 kW	85 € kW <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	
	Ugradnja	1400 € kW <sup>-1</sup>	[4], [114]	
	Naponski pretvarač	400 € kW <sup>-1</sup>	[2]	
	Troškovi održavanja	2% kapitalnog troška godišnje	[2], [4]	
	Troškovi transporta	1700 € kW <sup>-1</sup>	[4]	
	Životni vijek	25 godina	[16]	
	Baterija	Kapitalni trošak	225 € kWh <sup>-1</sup>	[20]
Trošak održavanja		0.5 € kWh <sup>-1</sup> godišnje		
Naponski pretvarač		240 € kW <sup>-1</sup>	[20]	
PEM elektrolizator	Kapitalni trošak	1350 € kW <sup>-1</sup>	[108]	
	Trošak zamjene svežnja	465 € kW <sup>-1</sup>		
	Troškovi održavanja	0.01 € h <sup>-1</sup>		
	Životni vijek uređaja	20 godina		
	Naponski pretvarač	240 € kW <sup>-1</sup>	[20]	
PEM gorivni članak	Kapitalni trošak	1750 € kW <sup>-1</sup>	[20]	
	Trošak zamjene svežnja	1500 € kW <sup>-1</sup>		
	Troškovi održavanja	0.01 € h <sup>-1</sup>	[2]	
	Životni vijek uređaja	20 godina		
	Naponski pretvarač	240 € kW <sup>-1</sup>	[20]	
Spremnik vodika	Kapitalni trošak	10 € kWh <sup>-1</sup>	[108]	
	Troškovi održavanja	0.25% kapitalnog troška godišnje	[14]	
	Životni vijek	25 godina	[20]	
Kompresor	Kapitalni trošak	2200 € kW <sup>-1</sup>	[21]	
	Troškovi održavanja	2% kapitalnog troška godišnje	[21]	
	Naponski pretvarač	400 € kW <sup>-1</sup>	[2]	
	Životni vijek	20 godina		

Povrat sredstava na kraju razmatranog vremenskog perioda je definirana kao vrijednost svih komponenata sustava u ovisnosti o preostalom životnom vijeku pojedine komponente. Na kraju razmatranog vremenskog perioda neke od sastavnih komponenata sustava mogu još

uvijek imati popriličnu vrijednost, što se svakako ne bi smjelo zanemariti. Na vrijednost povrata sredstava utječe samo vrijednost kapitalnog troška pojedine komponente ili kapitalni trošak zamjene, dok kapitalni troškovi ugradnje i transporta ne utječu na vrijednost povrata sredstava na kraju razmatranog vremenskog perioda. Ukupna vrijednost povrata sredstava je definirana kao:

$$SSP = \sum_{n_p} CC_{n_p} \frac{RL_{n_p}}{\bar{L}_{n_p}} \quad (5.20)$$

gdje je  $CC_{n_p}$  kapitalni trošak razmatrane  $n_p$  komponente sustava,  $RL_{n_p}$  je preostalo vrijeme životnog vijeka razmatrane  $n_p$  komponente sustava, a  $\bar{L}_{n_p}$  je srednja vrijednost životnog vijeka razmatrane  $n_p$  komponente sustava.

Faktor povrata kapitala je definiran kao:

$$CRF = \frac{d(1+d)^{n_g}}{(1+d)^{n_g} - 1} \quad (5.21)$$

gdje je  $d$  godišnja kamatna stopa, usvojena vrijednost od 6%, a  $n_g$  broj godina razmatranog vremenskog perioda. Na godišnju kamatnu stopu utječe godišnja inflacija. U svrhu ovog istraživanja se pretpostavlja da inflacija utječe jednako na sve komponente razmatranog HRES-a, pa se prema tome godišnja kamatna stopa može smatrati konstantnom vrijednošću [36].

Ekonomska funkcija cilja minimuma normalizirane cijene korisne energije ( $f_3$ ) je definirana kao:

$$f_3 = \min \left[ \frac{ALC}{(1 - LoPP) \cdot \frac{\sum_t P_L(t) \cdot \Delta t}{n_g}} \right] \quad (5.22)$$

gdje je  $LoPP$  faktor ne zadovoljavanja potreba opterećenja krajnjeg korisnika, a  $P_L$  je snaga opterećenja u trenutku  $t$ .



## 6. REZULTATI I DISKUSIJA

U ovom poglavlju je izvršena analiza postignutih rezultata dimenzioniranja i simulacija rada razmatranih HRES slučajeva. Razmatrani HRES slučajevi su:

- Strategija upravljanja energijom A i konstantan profil opterećenja (A-1)
- Strategija upravljanja energijom A i stohastički profil opterećenja (A-2)
- Strategija upravljanja energijom A i impulsni profil opterećenja (A-3)
- Strategija upravljanja energijom B i konstantan profil opterećenja (B-1)
- Strategija upravljanja energijom B i stohastički profil opterećenja (B-2)
- Strategija upravljanja energijom B i impulsni profil opterećenja (B-3)

### 6.1. Rezultati simulacija i dimenzioniranja

Rezultati dimenzioniranja višeciljnom optimizacijom su prezentirani u obliku Pareto granice. Višeciljna optimizacija je izvršena korištenjem MATLAB GA Optimization Toolbox-a. GA optimizacija svakog od razmatranih slučajeva je izvršena za populaciju od 500 jedinki i 250 generacija (iteracija). Iz svake generacije se izdvaja 40% najbolje ocijenjenih ne dominiranih rješenja od kojih se tvori Pareto granica. Prema tome, svaka Pareto granica je sačinjena od 200 optimalnih rješenja.

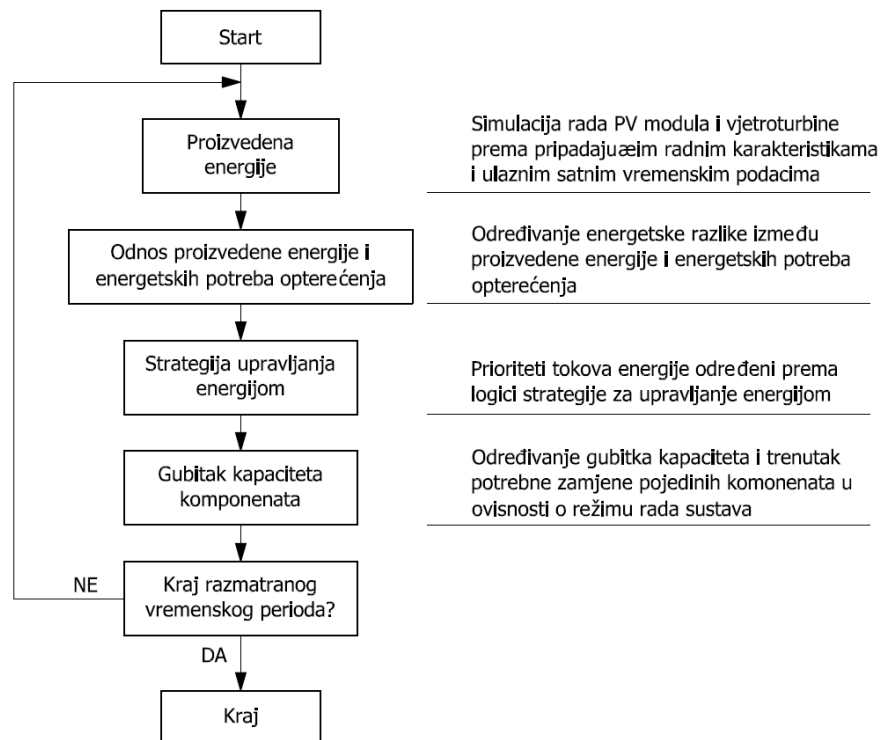
Kako bi se suzio izbor mogućih rješenja, sva Pareto rješenja s vrijednošću  $LCOE$  većom od 1.3 €/kWh i učinkovitošću manjom od 40% su izdvojena. Rezultati učinkovitosti su prikazani u rasponu od 40% do 80%, a rezultati ukupne pouzdanosti u rasponu od 40% do 250%. Vrijednost od 100% pouzdanosti sustava je definirana kao:

$$SR = \exp \left[ \frac{\left(1 - \frac{C_{BT}^{EOL}}{C_{BT,r}}\right) 100\%}{L_{BT}^{float}} \right] \cdot \exp \left[ \frac{\left(1 - \frac{\dot{m}_{EL,r}^{EOL}}{\dot{m}_{EL,r}^{BOL}}\right) 100\%}{L_{EL}^{sys}} \right] \cdot \exp \left[ \frac{\left(1 - \frac{P_{FC,r}^{EOL}}{P_{FC,r}^{BOL}}\right) 100\%}{L_{FC}^{sys}} \right] \quad (6.1)$$

gdje je  $C_{BT,r}$  nazivni kapacitet baterije na početku životnog vijeka,  $C_{BT}^{EOL}$  je kapacitet baterije na kraju životnog vijeka,  $L_{BT}^{float}$  je životni vijek baterije procijenjen od strane proizvođača (tablica 3.6),  $\dot{m}_{EL,r}^{BOL}$  je maseni protok proizvedenog vodika u nazivnoj radnoj točki elektrolizatora na

početku životnog vijeka,  $\dot{m}_{EL,r}^{EOL}$  je maseni protok proizvedenog vodika u nazivnoj radnoj točki elektrolizatora na kraju životnog vijeka,  $L_{EL}^{SYS}$  je životni vijek elektrolizator uređaja (tablica 5.2),  $P_{FC,r}^{BOL}$  je nazivna snaga FC uređaja na početku životnog vijeka,  $P_{FC,r}^{EOL}$  je nazivna snaga FC uređaja na kraju životnog vijeka, a  $L_{FC}^{SYS}$  je životni vijek FC uređaja (tablica 5.2). Vrijednosti od preko 100% pouzdanosti su postignute za slučajeve gdje je sustav rezultirao s malim vrijednostima radnih sati elektrolizatora i FC-a (niske vrijednosti faktora iskorištenja kapaciteta) i visokim vrijednostima životnog vijeka baterije.

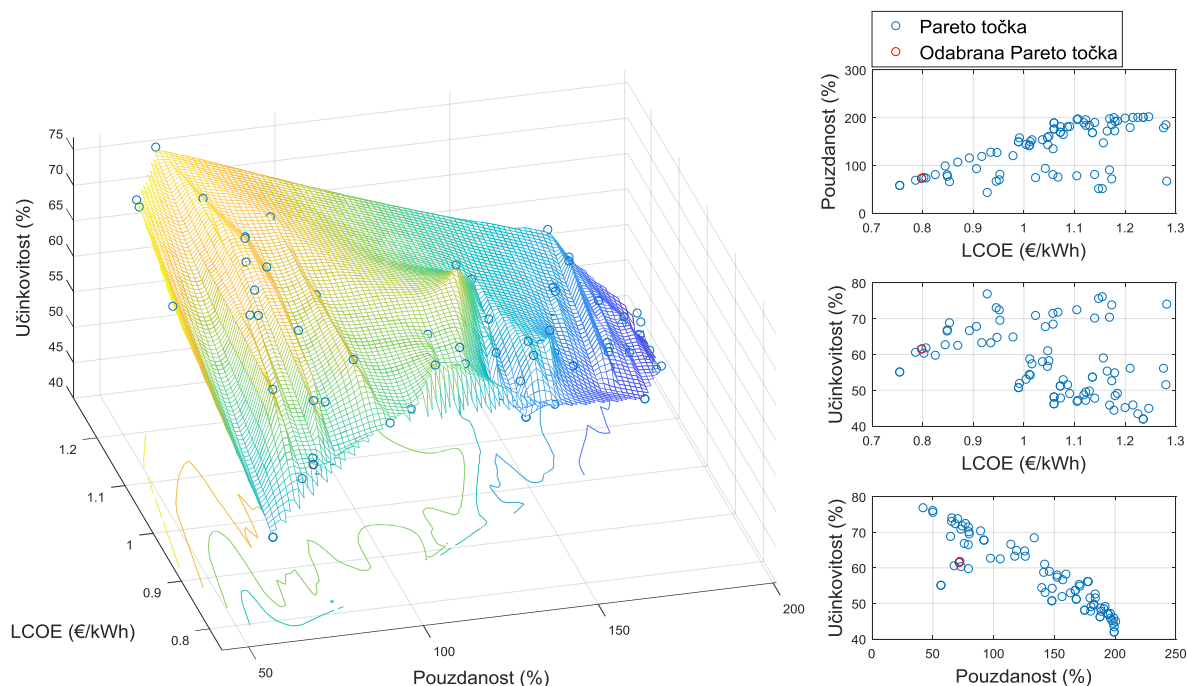
Radne performanse HRES-a su simulirane korištenjem programskog paketa MATLAB. Svi matematički modeli radnih karakteristika komponenata i dinamika gubitka kapaciteta su implementirani u programsko sučelje MATLAB, te su izrađena dva simulatora rada sustava prema logikama upravljanja razmatranih EMS. Sve simulacije rada sustava su izvršene za razmatrani vremenski period od 20 godina, uz jednosatnu rezoluciju. Nadalje, svaka simulacija je započinjala sa 100% stanjem napunjenosti baterije i tlakom spremnika vodika od 46 bar (25% kapaciteta spremnika vodika). Slika 6.1 prikazuje dijagram toka rada HRES simulatora.



Slika 6.1: Dijagram toka simulatora rada HRES-a

### 6.1.1. Rezultati razmatranog slučaja A-1

Slika 6.2 prikazuje Pareto granicu optimalnih rješenja razmatranog slučaja A-1, a tablica 6.1 prikazuje kriterije po kojima je izvršen izbor Pareto rješenja i ukupna broj rješenja za različite domene. Tablica 6.2 prikazuje rezultate funkcija cilja i dimenzionirane vrijednosti komponenata sustava izabranih rješenja za razmatrani slučaj A-1.



Slika 6.2: Pareto granica optimalnih rješenja za razmatrani slučaj A-1

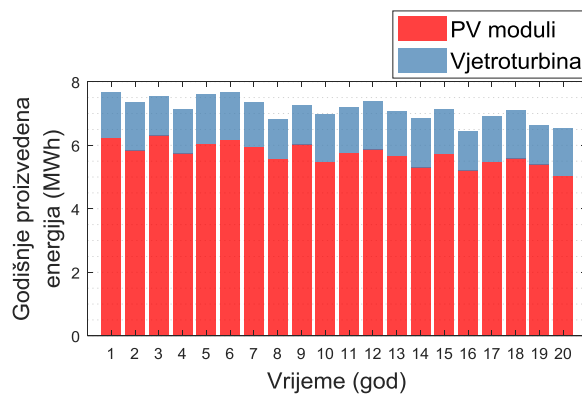
Tablica 6.1: Prikaz kriterija izbora Pareto rješenja za razmatrani slučaj A-1

$\eta_s$ (%)	SR (%)	LCOE (€/kWh)						
		< 0.75	< 0.80	< 0.85	< 0.90	< 0.95	< 1.00	< 1.05
> 50%	> 50%	0	4	10	13	18	24	34
	> 70%	0	1	7	9	13	18	28
	> 90%	0	0	1	3	7	11	20
	> 110%	0	0	0	1	4	8	16
> 60%	> 50%	0	2	7	10	15	18	21
	> 70%	0	<b>1</b>	6	8	12	14	17
	> 90%	0	0	1	3	7	8	10
	> 110%	0	0	0	1	4	5	6
> 70%	> 50%	0	0	0	0	1	2	3
	> 70%	0	0	0	0	0	0	1
	> 90%	0	0	0	0	0	0	0
	> 110%	0	0	0	0	0	0	0

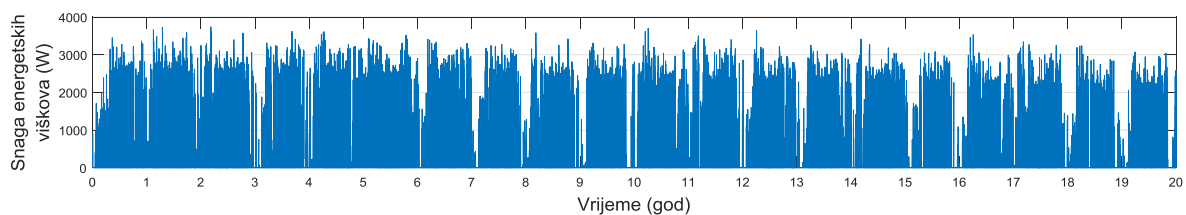
Tablica 6.2: Prikaz rezultata dimenzioniranja izabranih rješenja za razmatrani slučaj A-1

	$LCOE$ (€/kWh)	$SR$ (%)	$\eta_s$ (%)	$P_{PV,r}$ (W)	$P_{WT,r}$ (W)	$C_{BT,r}$ (kWh)	$P_{EL,r}$ (W)	$P_{FC,r}$ (W)	$V_{H_2,r}$ (m <sup>3</sup> )	$\beta$ (°C)	$y$ (m)
1.	0.799	72.14	61.39	3200	800	35	1500	1500	0.95	38	18

Slika 6.3 prikazuje godišnju distribuciju proizvedene energije za razmatrani slučaj A-1, gdje se može vidjeti postepeni pad ukupne proizvedene energije uslijed gubitka kapaciteta PV modula. Prosječna godišnja proizvodnja energije iznosi 7,133.7 kWh, prosječna proizvedena energija prvih 5 godina razmatranog vremenskog perioda iznosi 7,462.4 kWh, dok prosječna proizvedena energija zadnjih 5 godina razmatranog vremenskog perioda iznosi 6,731.6 kWh. Energetske potrebe opterećenja krajnjeg korisnika su zadovoljene izravno iz proizvedene OIE s 54.56% energije, 44.27% energetske potreba je zadovoljeno iz baterije, a 1.15% iz FC-a, dok 0.02% energetske potreba opterećenja krajnjeg korisnika nije zadovoljeno. Razmatrani A-2 slučaj je rezultirao s 30.4% neiskorištene energije. Slika 6.4 prikazuje distribuciju neiskorištene energije.

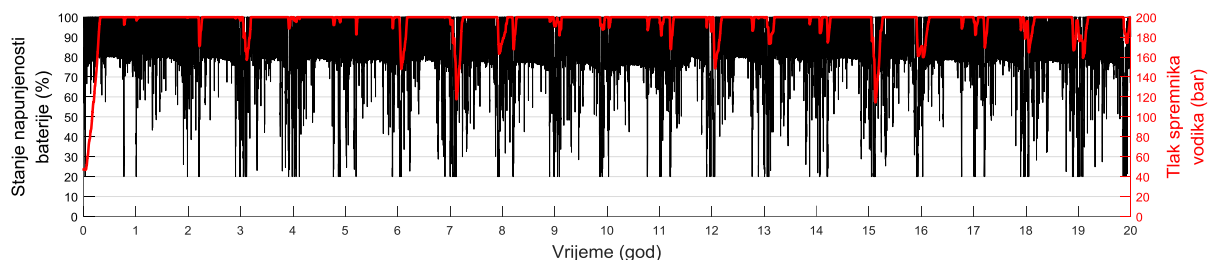


Slika 6.3: Godišnja distribucija proizvedene energije za razmatrani slučaj A-1



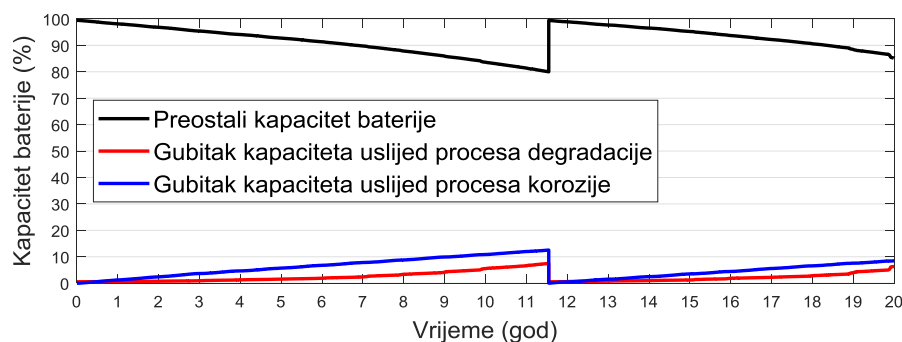
Slika 6.4: Neiskorištena energije, razmatrani slučaj A-1

Slika 6.5 prikazuje dinamiku punjenja i pražnjenja baterije i dinamiku proizvodnje i potrošnje vodika. Prosječna vrijednost  $SoC_{BT}$  iznosi 85%, dok je puna dubina pražnjenja baterije korištena pretežito u početkom i krajem svake godine. Nadalje, tlak spremnika vodika u nijednom trenutku razmatranog vremenskog perioda nije bio niži od 100 bara. Spremnik vodika je proveo 80.05% razmatranog vremenskog perioda pri nazivnom tlaku spremnika.

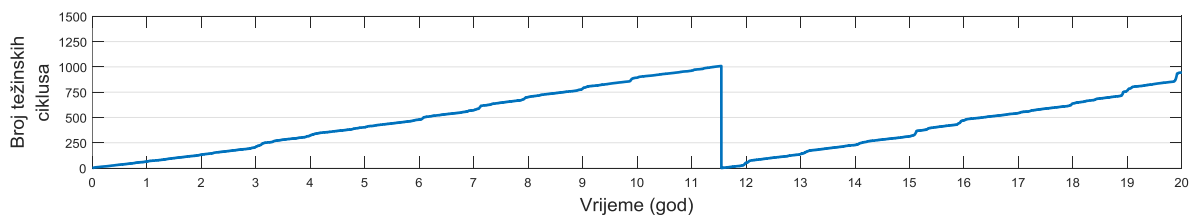


Slika 6.5: Ciklusi punjenja i pražnjenja baterije i dinamika proizvodnje i potrošnje vodika za razmatrani slučaj A-1

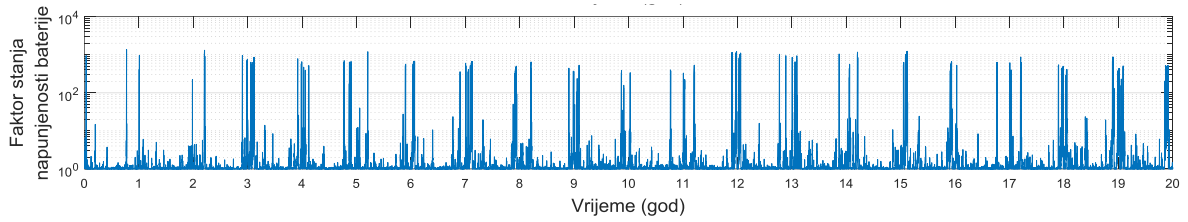
Slika 6.6 prikazuje dinamiku gubitka kapaciteta baterije. Za vrijeme razmatranog vremenskog perioda je izvršena jedna zamjena baterije uz postignuti životni vijek baterije od 11.54 godina. Gubitak kapaciteta baterije uslijed procesa korozije je rezultirao dominantnije u odnosu na proces degradacije aktivne mase, što je uzrokovano pretežitim radom baterije u rasponu  $SoC_{BT}$  od 70% do 100%, te manjim brojem ciklusa dubokog pražnjenja (slika 6.5). Utjecaj dubokog pražnjenja na gradaciju aktivne mase je za vrijeme zimskih mjeseci je vidljiv u rastu faktora stanja napunjenosti baterije, slika 6.8, i rastu faktora kiselinske stratifikacije, slika 6.11. Učestali rad baterije pri visokim vrijednostima  $SoC_{BT}$ , uz povremene cikluse dubokog pražnjenja, je postignut visokim vrijednostima proizvedene energije, postignute visokom vrijednošću dimenzioniranog proizvodnog kapaciteta. Slike 6.7 do 6.11 prikazuju dinamiku utjecaja pojedinog faktora na proces degradacije aktivne mase, a slika 6.12 prikazuje dinamiku prirasta efektivne debljine korozivnog sloja uslijed procesa korozije.



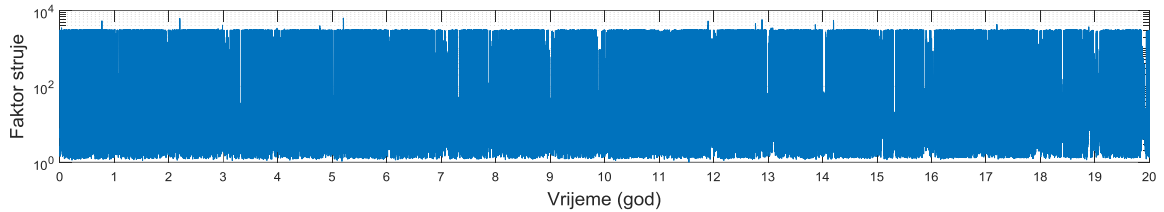
Slika 6.6: Dinamika gubitka kapaciteta baterije, razmatrani slučaj A-1



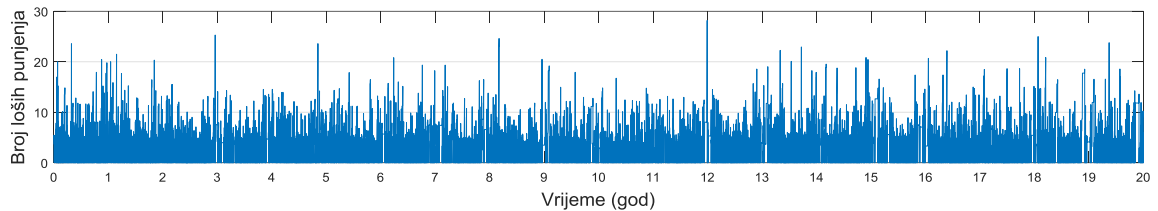
Slika 6.7: Dinamika prirasta težinskog broja ciklusa pražnjenja, razmatrani slučaj A-1



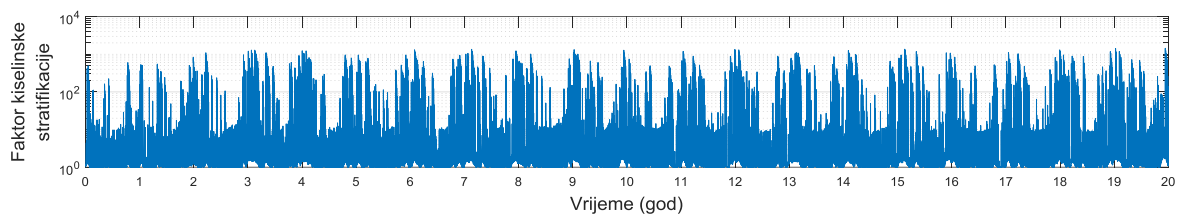
Slika 6.8: Dinamika faktora stanja napunjenosti baterije, razmatrani slučaj A-1



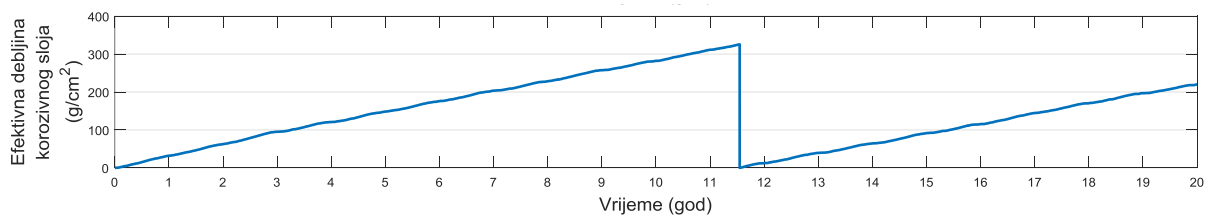
Slika 6.9: Dinamika faktora struje, razmatrani slučaj A-1



Slika 6.10: Dinamika prirasta broja loših punjenja baterije, razmatrani slučaj A-1



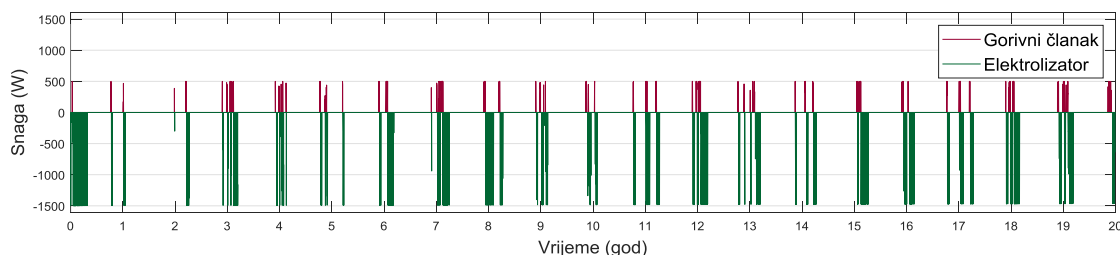
Slika 6.11: Dinamika faktora kiseline stratifikacije, razmatrani slučaj A-1



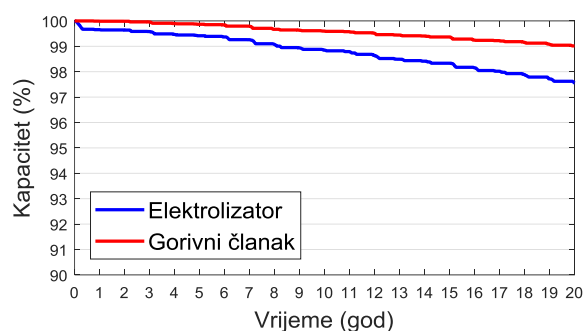
Slika 6.12: Dinamika prirasta efektivne debljine korozivnog sloja, razmatrani slučaj A-1

Slika 6.13 prikazuje dinamiku rada elektrolizatora i gorivnih članaka. Srednja snaga rada elektrolizatora je 61.92% kroz 4,809 radnih sati i 706 ciklusa uključivanja i isključivanja, što je uzrokovalo gubitak kapaciteta od 2.44%, tablica 6.3. Niske vrijednosti ukupnog broja radnih sati elektrolizatora su posljedica visoke razine stanja napunjenosti spremnika vodika, uzrokovano visokom razinom proizvedene energije. FC je radio prosječnom snagom od 28.25% kroz 2,496 radnih sati i 228 ciklusa uključivanja i isključivanja, što je uzrokovalo gubitak

kapaciteta od 0.99%, tablica 6.3. Slika 6.14 prikazuje dinamiku gubitka kapaciteta elektrolizatora i FC-a.



Slika 6.13: Dinamika rada elektrolizatora i gorivnog članka, razmatrani slučaj A-1



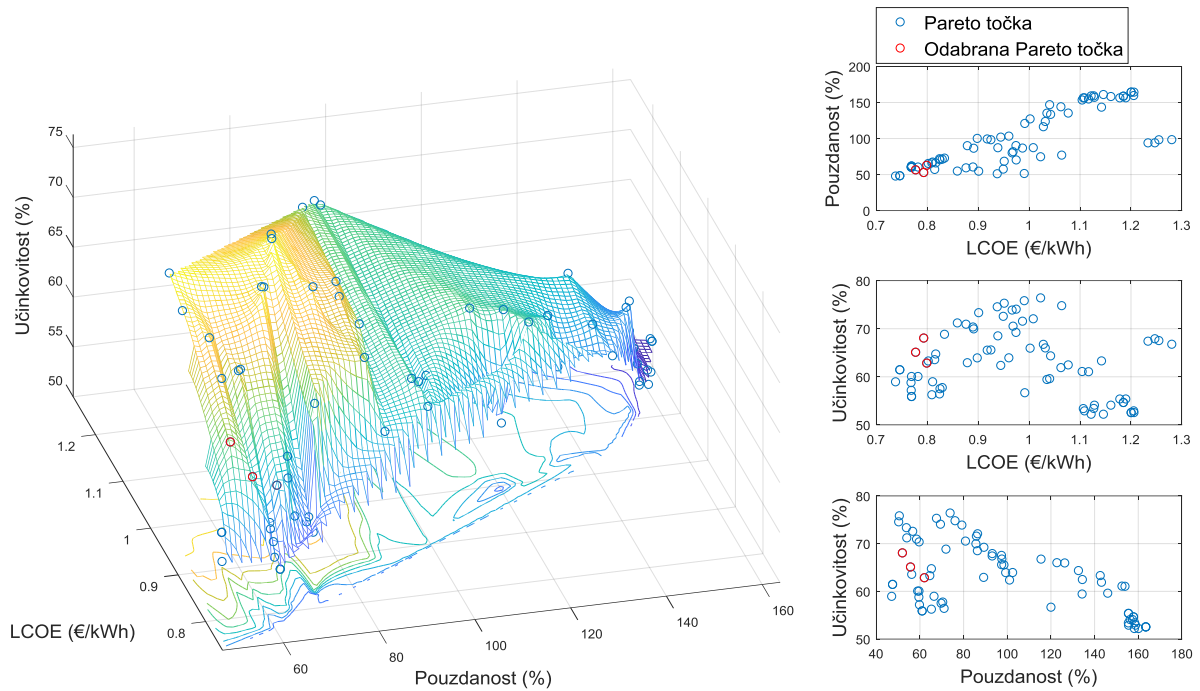
Slika 6.14: Dinamika gubitka kapaciteta elektrolizatora i gorivnog članka, razmatrani slučaj A-1

Tablica 6.3: Ključni pokazatelji performansi rada HRES-a za razmatrani slučaj A-1

Komponenta	Radni parametar		
Baterija	Prosječni životni vijek	11.54	godina
	Broj zamjena	1	–
	Prosječno vrijednost $SoC_{BT}$	85.00	%
Elektrolizator	Prosječna relativna radna snaga	61.92	%
	Preostali kapacitet na kraju razmatranog vremenskog perioda	97.56	%
	Ukupno radno vrijeme	4,809	h
	Ukupan broj uključivanja	706	–
	Prosječno radno vrijeme po uključivanju	6.81	h
Gorivni članak	Prosječna relativna radna snaga	28.25	%
	Preostali kapacitet na kraju razmatranog vremenskog perioda	99.01	%
	Ukupno radno vrijeme	2,496	h
	Ukupan broj uključivanja	228	–
	Prosječno radno vrijeme po uključivanju	10.95	h

### 6.1.2. Rezultati razmatranog slučaja A-2

Slika 6.15 prikazuje Pareto granicu optimalnih rješenja razmatranog slučaja A-2, a tablica 6.4 prikazuje kriterije po kojima je izvršen izbor Pareto rješenja i ukupna broj rješenja za različite domene. Tablica 6.5 prikazuje rezultate funkcija cilja i dimenzionirane vrijednosti komponenata sustava izabranih rješenja za razmatrani slučaj A-2, od kojih je za daljnju analizu izabrano rješenje br. 1.



Slika 6.15: Pareto granica optimalnih rješenja za razmatrani slučaj A-2

Tablica 6.4: Prikaz kriterija izbora Pareto rješenja za razmatrani slučaj A-2

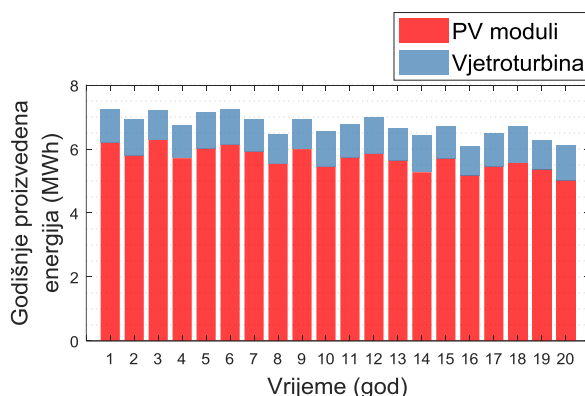
$\eta_s$ (%)	SR (%)	LCOE (€/kWh)						
		< 0.75	< 0.80	< 0.85	< 0.90	< 0.95	< 1.00	< 1.05
> 50%	> 50%	0	9	18	24	30	40	48
	> 70%	0	0	3	6	10	16	24
	> 90%	0	0	0	1	4	6	12
	> 110%	0	0	0	0	0	1	7
> 60%	> 50%	0	3	7	13	19	28	34
	> 70%	0	0	1	4	8	13	19
	> 90%	0	0	0	1	4	5	9
	> 110%	0	0	0	0	0	0	4
> 70%	> 50%	0	0	0	3	5	12	14
	> 70%	0	0	0	0	0	3	5
	> 90%	0	0	0	0	0	0	0
	> 110%	0	0	0	0	0	0	0



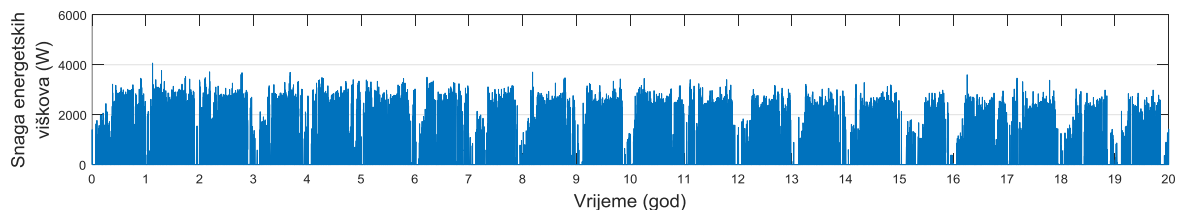
Tablica 6.5: Prikaz rezultata dimenzioniranja izabranih rješenja za razmatrani slučaj A-2

	$LCOE$ (€/kWh)	$SR$ (%)	$\eta_s$ (%)	$P_{PV,r}$ (W)	$P_{WT,r}$ (W)	$C_{BT,r}$ (kWh)	$P_{EL,r}$ (W)	$P_{FC,r}$ (W)	$V_{H_2,r}$ (m <sup>3</sup> )	$\beta$ (°)	$y$ (m)
1.	0.778	55.90	65.00	3200	600	34	1400	1500	0.80	43	17
2.	0.800	62.25	62.75	3100	800	34	1700	1500	0.80	42	19
3.	0.794	52.18	67.96	3000	600	35	1500	1500	0.80	41	19

Slika 6.16 prikazuje godišnju distribuciju proizvedene energije za razmatrani slučaj A-2. Prosječna godišnja proizvodnja energije iznosi 6,732.5 kWh, prosječna proizvedena energija prvih 5 godina razmatranog vremenskog perioda iznosi 7,056.6 kWh, dok prosječna proizvedena energija zadnjih 5 godina razmatranog vremenskog perioda iznosi 6,338.6 kWh, kao posljedica degradacije PV modula. Energetske potrebe opterećenja krajnjeg korisnika su zadovoljene izravno iz proizvedene OIE s 54.39% energije, 44.11% energetskih potreba je zadovoljeno iz baterije, a 1.42% iz FC-a, dok 0.08% energetskih potreba opterećenja krajnjeg korisnika nije zadovoljeno. Razmatrani A-2 slučaj je rezultirao s 25.97% neiskorištene energije. Slika 6.17 prikazuje distribuciju neiskorištene energije.

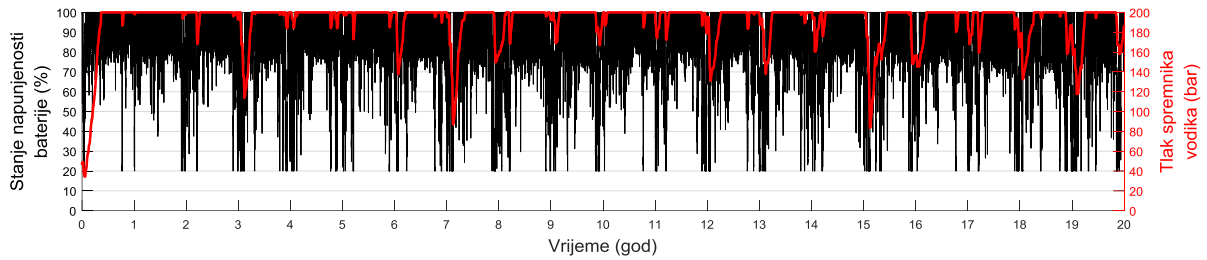


Slika 6.16: Godišnja distribucija proizvedene energije za razmatrani slučaj A-2



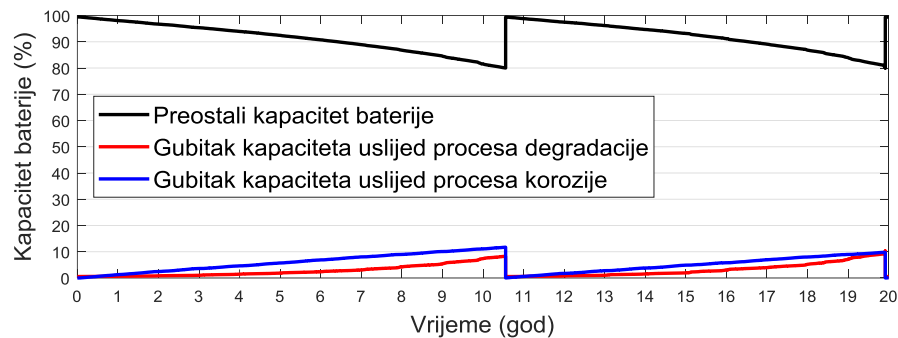
Slika 6.17: Neiskorištena energije, razmatrani slučaj A-2

Slika 6.18 prikazuje dinamiku punjenja i pražnjenja baterije i dinamiku proizvodnje i potrošnje vodika za razmatrani slučaj A-2. Prosječna vrijednost  $SoC_{BT}$  iznosi 82.26%, uz češće korištenje većih dubina pražnjenja, u usporedbi sa slučajem A-1. Tlak spremnika vodika je proveo 72.13% razmatranog vremenskog perioda pri nazivnom tlaku spremnika.

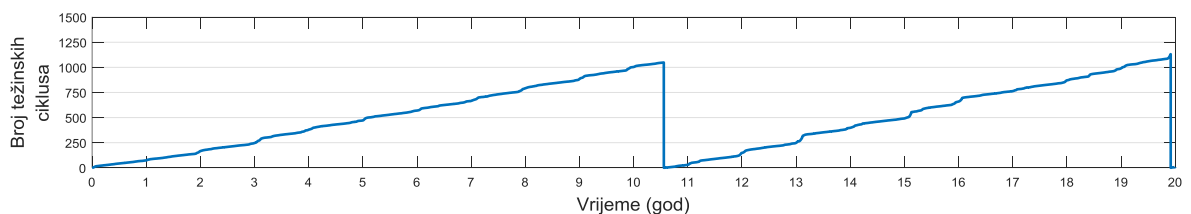


Slika 6.18: Ciklusi punjenja i pražnjenja baterije i dinamika proizvodnje i potrošnje vodika za razmatrani slučaj A-2

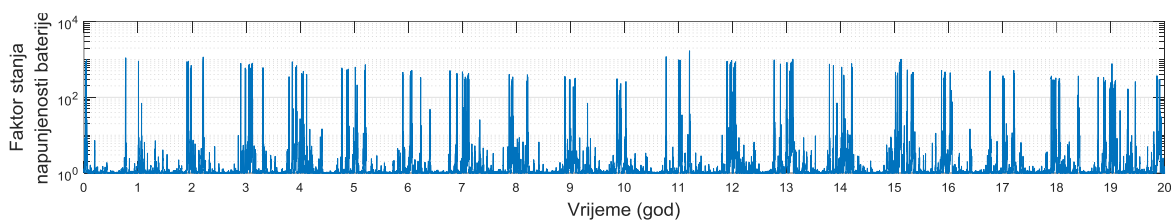
Slika 6.19 prikazuje dinamiku gubitka kapaciteta baterije. Za vrijeme razmatranog vremenskog perioda su izvršena dvije zamjena baterije uz prosječni životni vijek baterije od 9.96 godina. Prva baterija je rezultirala približno 0.6 godina dužim životnim vijekom od druge baterije. Nadalje, kao i za slučaj A-1, kod prve baterije je gubitak kapaciteta uslijed procesa korozije je bio dominantniji u odnosu na proces degradacije aktivne mase, dok je za drugu bateriju utjecaj oba mehanizma gubitka kapaciteta bio podjednak. Povećanje utjecaja degradacije aktivne mase kod druge baterije u odnosu na prvu je uzrokovan smanjenjem proizvedene energije uslijed degradacije PV modula, što je izravno utjecalo na učestalije potrebe za dubokim pražnjenjem i duže vrijeme na niskim vrijednostima  $SoC_{BT}$ . Slike 6.20 do 6.24 prikazuju dinamiku utjecaja pojedinog faktora na proces degradacije aktivne mase, a slika 6.25 prikazuje dinamiku prirasta efektivne debljine korozivnog sloja uslijed procesa korozije za razmatrani slučaj A-2.



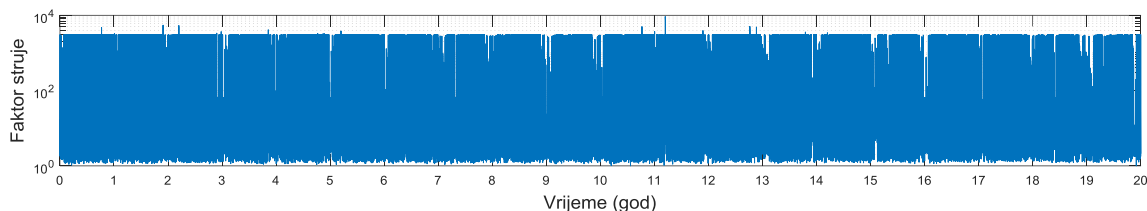
Slika 6.19: Dinamika gubitka kapaciteta baterije, razmatrani slučaj A-2



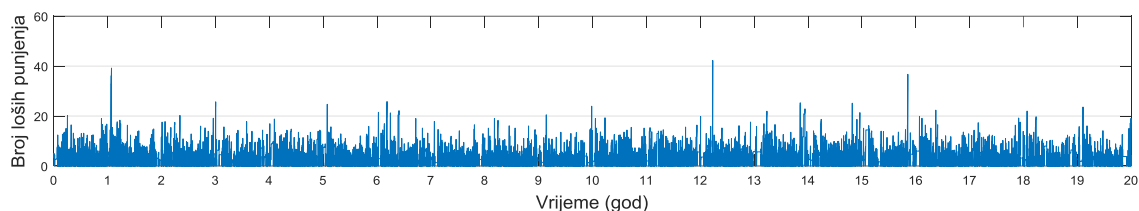
Slika 6.20: Dinamika prirasta težinskog broja ciklusa pražnjenja, razmatrani slučaj A-2



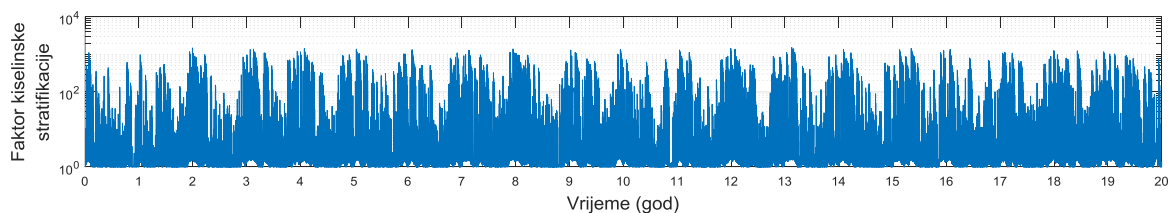
Slika 6.21: Dinamika faktora stanja napunjenosti baterije, razmatrani slučaj A-2



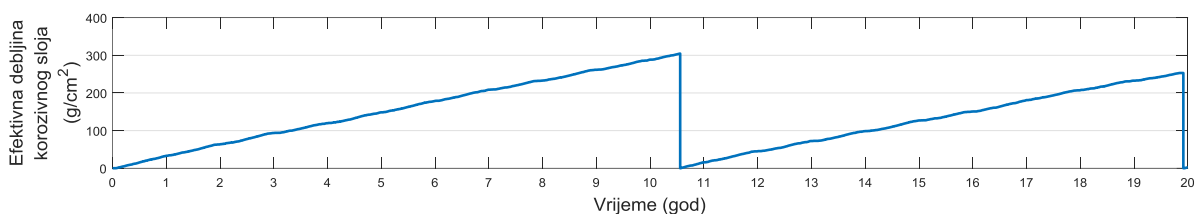
Slika 6.22: Dinamika faktora struje, razmatrani slučaj A-2



Slika 6.23: Dinamika prirasta broja loših punjenja baterije, razmatrani slučaj A-2



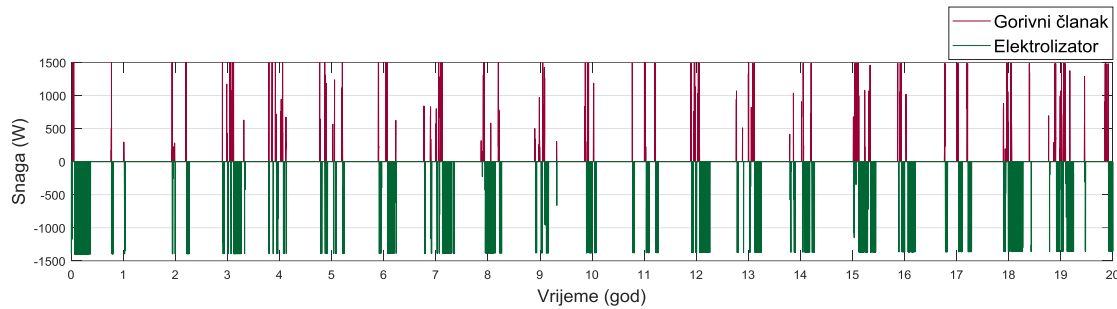
Slika 6.24: Dinamika faktora kiselinske stratifikacije, razmatrani slučaj A-2



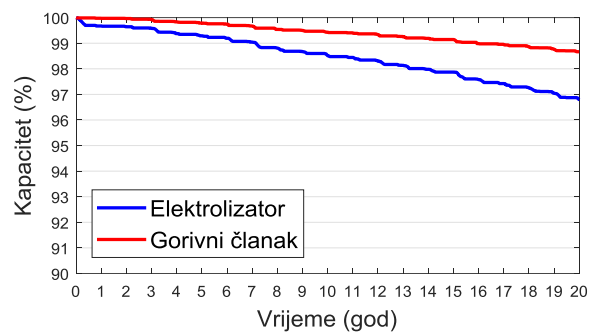
Slika 6.25: Dinamika prirasta efektivne debljine korozivnog sloja, razmatrani slučaj A-2

Slika 6.26 prikazuje dinamiku rada elektrolizatora i gorivnih članaka za razmatrani slučaj A-2. Srednja snaga rada elektrolizatora je 72.46% kroz 5,419 radnih sati i 1056 ciklusa uključivanja i isključivanja, što je uzrokovalo gubitak kapaciteta od 3.20%. Kao i za slučaj A-1, niske vrijednosti ukupnog broja radnih sati elektrolizatora su posljedica visoke razine stanja napunjenosti spremnika vodika kroz razmatrani vremenski period. FC je radio 3,044 radna sata uz 477 ciklusa uključivanja i isključivanja, što je uzrokovalo gubitak kapaciteta od 1.33%. Slika

6.14 prikazuje dinamiku gubitka kapaciteta elektrolizatora i FC-a. Tablica 6.6 prikazuje ključne pokazatelje performansi HRES-a.



Slika 6.26: Dinamika rada elektrolizatora i gorivnog članka, razmatrani slučaj A-2



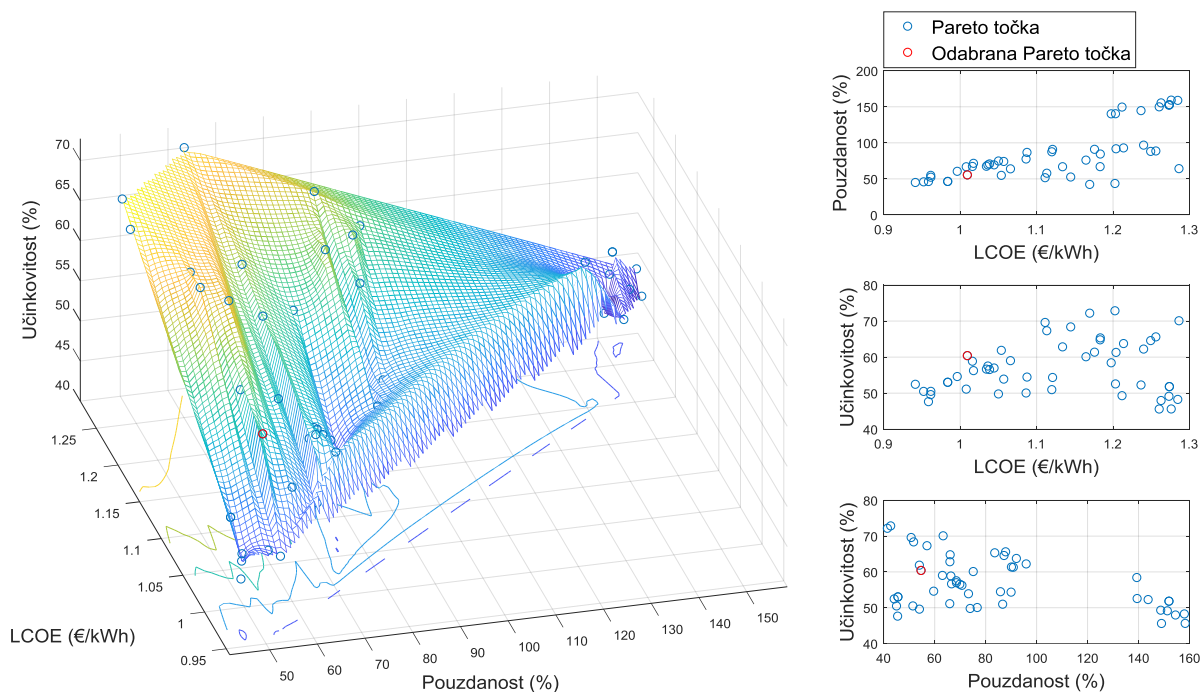
Slika 6.27: Dinamika gubitka kapaciteta elektrolizatora i gorivnog članka, razmatrani slučaj A-2

Tablica 6.6: Ključni pokazatelji performansi rada HRES-a za razmatrani slučaj A-2

Komponenta	Radni parametar		
Baterija	Prosječni životni vijek	9.96	godina
	Broj zamjena	2	–
	Prosječno vrijednost $SoC_{BT}$	82.26	%
Elektrolizator	Prosječna relativna radna snaga	72.46	%
	Preostali kapacitet na kraju razmatranog vremenskog perioda	96.80	%
	Ukupno radno vrijeme	5,419	h
	Ukupan broj uključivanja	1056	–
	Prosječno radno vrijeme po uključivanju	5.13	h
Gorivni članak	Prosječna relativna radna snaga	28.35	%
	Preostali kapacitet na kraju razmatranog vremenskog perioda	98.67	%
	Ukupno radno vrijeme	3,044	h
	Ukupan broj uključivanja	477	–
	Prosječno radno vrijeme po uključivanju	6.38	h

### 6.1.3. Rezultati razmatranog slučaja A-3

Slika 6.28 prikazuje Pareto granicu optimalnih rješenja razmatranog slučaja A-3, a tablica 6.7 prikazuje kriterije po kojima je izvršen izbor Pareto rješenja i ukupna broj rješenja za različite domene. Tablica 6.8 prikazuje rezultate funkcija cilja i dimenzionirane vrijednosti komponenata sustava izabranih rješenja za razmatrani slučaj A-3.



Slika 6.28: Pareto granica optimalnih rješenja za razmatrani slučaj A-3

Tablica 6.7: Prikaz kriterija izbora Pareto rješenja za razmatrani slučaj A-3

$\eta_s$ (%)	SR (%)	LCOE (€/kWh)						
		< 0.75	< 0.80	< 0.85	< 0.90	< 0.95	< 1.00	< 1.05
> 50%	> 50%	0	0	0	0	0	2	10
	> 70%	0	0	0	0	0	0	2
	> 90%	0	0	0	0	0	0	0
	> 110%	0	0	0	0	0	0	0
> 60%	> 50%	0	0	0	0	0	0	<b>1</b>
	> 70%	0	0	0	0	0	0	0
	> 90%	0	0	0	0	0	0	0
	> 110%	0	0	0	0	0	0	0
> 70%	> 50%	0	0	0	0	0	0	0
	> 70%	0	0	0	0	0	0	0
	> 90%	0	0	0	0	0	0	0
	> 110%	0	0	0	0	0	0	0

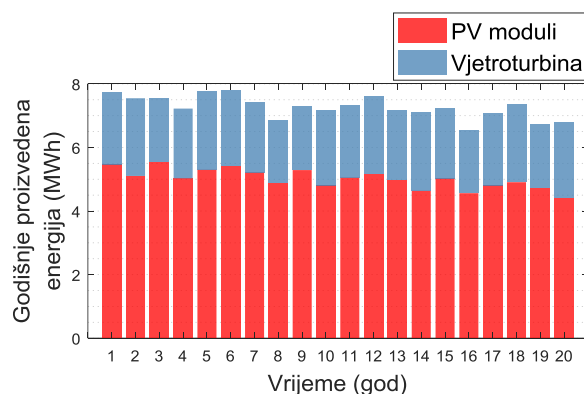
Tablica 6.8: Prikaz rezultata dimenzioniranja izabranih rješenja za razmatrani slučaj A-3

	$LCOE$ (€/kWh)	$SR$ (%)	$\eta_s$ (%)	$P_{PV,r}$ (W)	$P_{WT,r}$ (W)	$C_{BT,r}$ (kWh)	$P_{EL,r}$ (W)	$P_{FC,r}$ (W)	$V_{H_2,r}$ (m <sup>3</sup> )	$\beta$ (°L)	$y$ (m)
1.	1.010	54.83	60.27	2900	1300	45	2300	1500	0.75	54	17

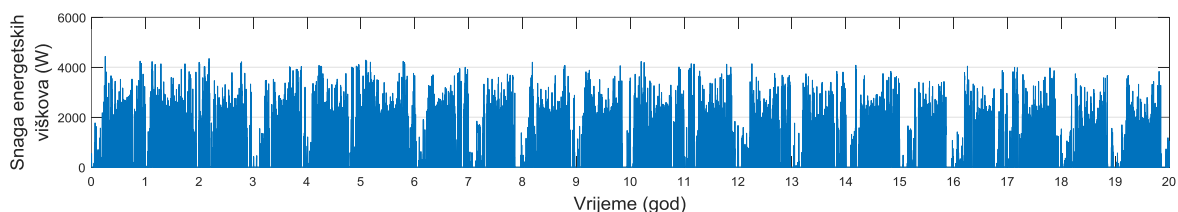
Slika 6.29 prikazuje godišnju distribuciju proizvedene energije za razmatrani slučaj A-3. Prosječna godišnja proizvodnja energije iznosi 7,264.8 kWh, prosječna proizvedena energija prvih 5 godina razmatranog vremenskog perioda iznosi 7,565 kWh, dok prosječna proizvedena energija zadnjih 5 godina razmatranog vremenskog perioda iznosi 6,895.6 kWh. U usporedbi s razmatranim slučajevima A-1 i A-2, slučaj A-3 je rezultirao sa povećanjem instaliranog kapaciteta vjetroturbine i nešto manjim instaliranim kapacitetom PV modula, ali i većim ukupnim proizvodnim kapacitetom, što je uzrokovano većim energetske potrebama profila opterećenja krajnjeg korisnika u noćnim satima dok nema Sunca (slika 3.9). Nadalje, kut nagiba PV modula je rezultirao većom vrijednošću, u usporedbi sa slučajevima A-1 i A-2, čime je postignuta bolja proizvodnja solarne energije u zimskim mjesecima. Razlog tome je su veće energetske potrebe opterećenja krajnjeg korisnika u zimskim mjesecima u odnosu na ljetne mjesec u godini (slika 3.10). Energetske potrebe opterećenja krajnjeg korisnika su zadovoljene izravno iz proizvedene OIE s 30.59% energije, 67.45% energetske potrebe je zadovoljeno iz baterije, a 1.93% iz FC-a, dok 0.03% energetske potrebe opterećenja krajnjeg korisnika nije zadovoljeno. Pošto je većinski udio energetske potrebe razmatranog impulsnog opterećenja u noćnim satima, kada se solarna energija ne može izravno koristiti za zadovoljavanje potreba opterećenja, upotreba baterije za zadovoljavanje potreba krajnjeg korisnika je značajno povišena, u usporedbi sa slučajevima A-1 i A-2. Nadalje, opravdano je zaključiti da većinski udio OIE kojim je izravno zadovoljeno 30.59% energetske potrebe opterećenja proizlazi iz energije vjetra. Razmatrani A-3 slučaj je rezultirao s 27.45% neiskorištene energije. Slika 6.30 prikazuje distribuciju neiskorištene energije.

Slika 6.31 prikazuje dinamiku punjenja i pražnjenja baterije i dinamiku proizvodnje i potrošnje vodika za razmatrani slučaj A-3. Iako su većinske energetske potrebe opterećenja u noćnim satima, baterija je rezultirala s većim dubinama pražnjenja samo u zimskim mjesecima. Relativno visoka vrijednost instaliranog proizvodnog kapaciteta je uspješno održavao srednju vrijednost  $SoC_{BT}$  na 82.30% kroz razmatrani vremenski period. Tlak spremnika vodika je proveo 75.08% razmatranog vremenskog perioda pri nazivnom tlaku spremnika. Međutim, u usporedbi sa slučajevima A-1 i A-2 kapacitet spremnika vodika je bolje iskorišten, jer je tlak

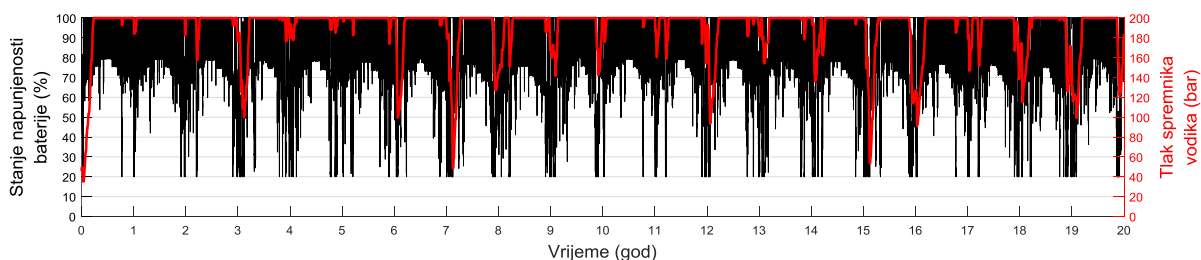
spremnika vodika padao na vrijednost nižu od 100 bara u više navrata kroz razmatrani vremenski period.



Slika 6.29: Godišnja distribucija proizvedene energije za razmatrani slučaj A-3



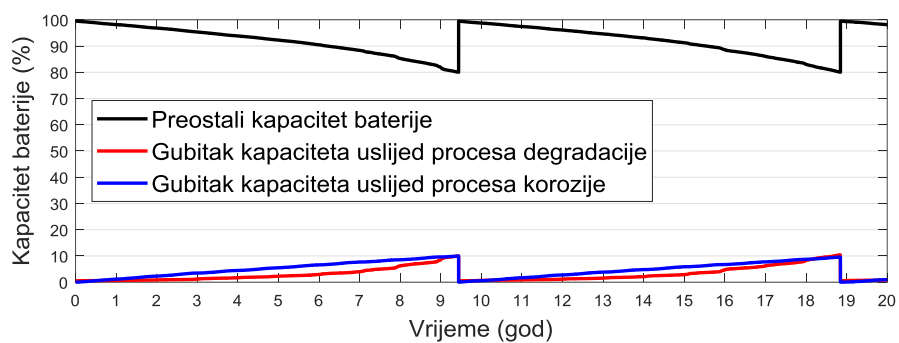
Slika 6.30: Neiskorištena energije, razmatrani slučaj A-3



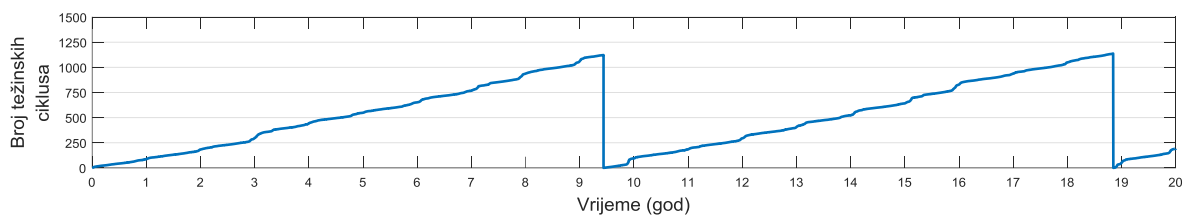
Slika 6.31: Ciklusi punjenja i pražnjenja baterije i dinamika proizvodnje i potrošnje vodika za razmatrani slučaj A-3

Slika 6.32 prikazuje dinamiku gubitka kapaciteta baterije za razmatrani slučaj A-3. Za vrijeme razmatranog vremenskog perioda su izvršena dvije zamjena baterije uz prosječni životni vijek baterije od 9.42 godina. Utjecaj mehanizama degradacije aktivne mase i korozije efektivne debljine korozivnog sloja su djelovali podjednako na gubitak kapaciteta obje baterije, uz podjednaki životni vijek. U usporedbi sa slučajem A-2, gdje je životni vijek druge baterije bio kraći u odnosu na prvu, slučaj A-3 uspijeva ostvariti slične radne uvijete za obje baterije. Uslijed relativno visokog instaliranog proizvodnog kapaciteta, za vrijeme životnog vijeka druge baterije je također bilo dostatno energije za uspješno održavanje visoke razine  $SoC_{BT}$ , pa je stoga baterije bila pod manjim utjecajem gubitka kapaciteta PV modula. Nadalje, slučaj A-3 je rezultirao boljim omjerom instalirane snage PV/WT u usporedbi sa slučajem A-2, što je također

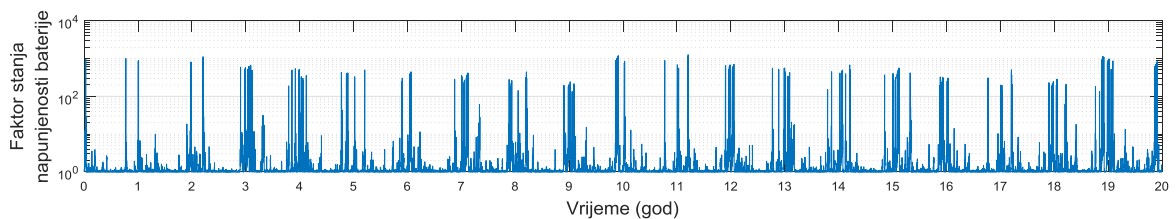
utjecalo na ostvarivanje podjednagog životnog vijeka obje baterije, dok je za slučaj A-2 održavanje visoke razine  $SoC_{BT}$  bilo pod većim utjecajem PV modula. Međutim, uslijed povišene razine korištenja baterije za slučaj A-3, u usporedbi sa slučajem A-2, srednja vrijednost životnog vijeka baterije je rezultirala manjom vrijednošću. Podjednak gubitak kapaciteta obje baterije je također vidljiv iz dinamike prirasta težinskih ciklusa, slika 6.33, i dinamike prirasta efektivnog korozivnog sloja, slika 6.38. Slike 6.33 do 6.37 prikazuju dinamiku utjecaja pojedinog faktora na proces degradacije aktivne mase, a slika 6.38 prikazuje dinamiku prirasta efektivne debljine korozivnog sloja uslijed procesa korozije za razmatrani slučaj A-3.



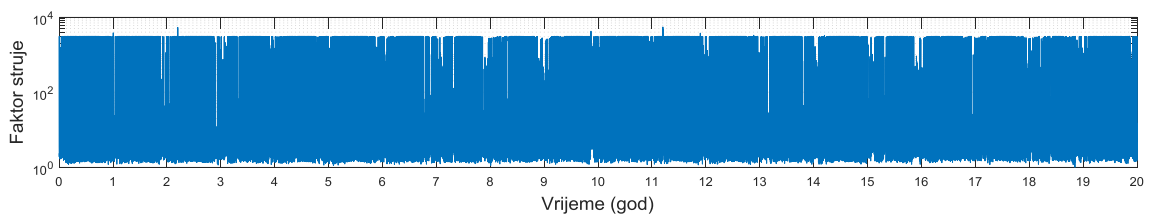
Slika 6.32: Dinamika gubitka kapaciteta baterije, razmatrani slučaj A-3



Slika 6.33: Dinamika prirasta težinskog broja ciklusa pražnjenja, razmatrani slučaj A-3

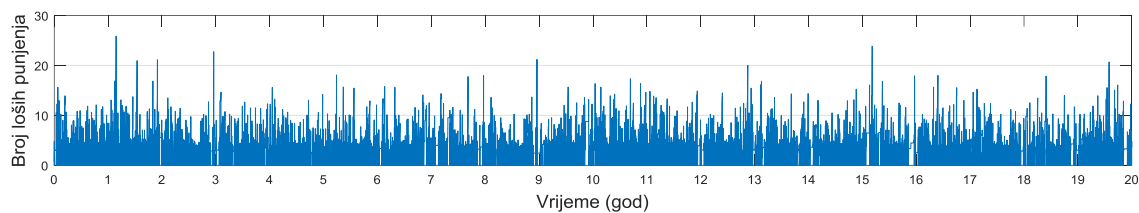


Slika 6.34: Dinamika faktora stanja napunjenosti baterije, razmatrani slučaj A-3

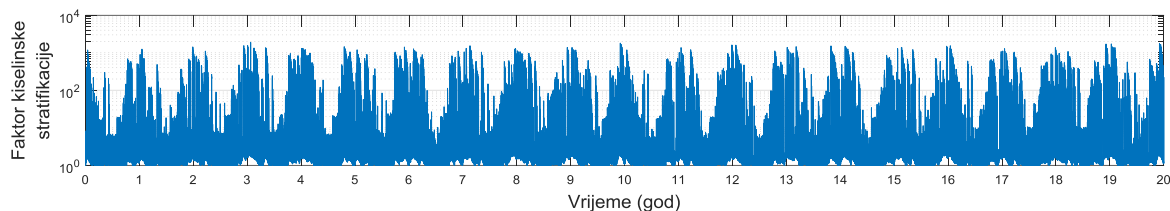


Slika 6.35: Dinamika faktora struje, razmatrani slučaj A-3

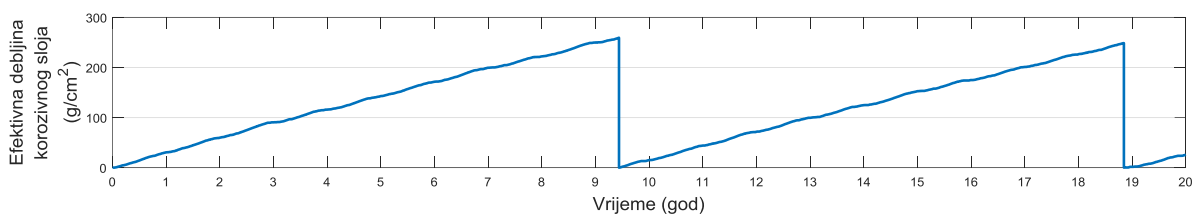




Slika 6.36: Dinamika prirasta broja loših punjenja baterije, razmatrani slučaj A-3

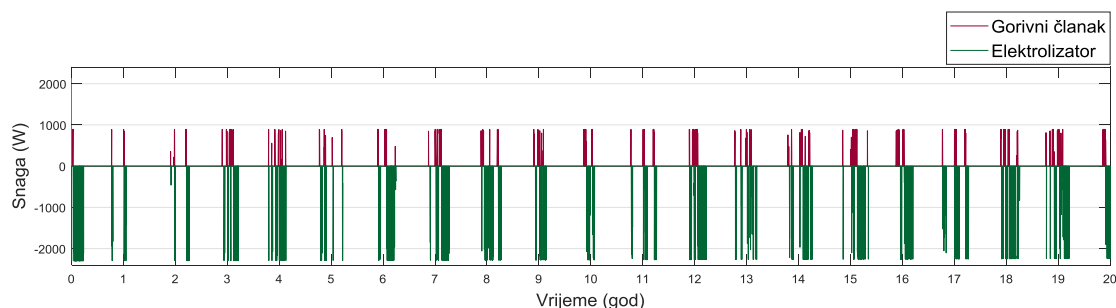


Slika 6.37: Dinamika faktora kiselinske stratifikacije, razmatrani slučaj A-3

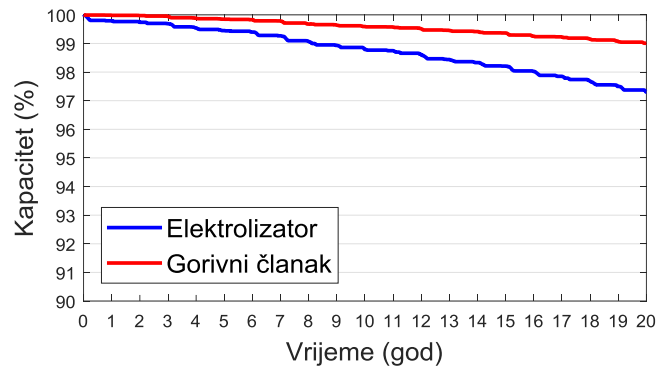


Slika 6.38: Dinamika prirasta efektivne debljine korozivnog sloja, razmatrani slučaj A-3

Slika 6.39 prikazuje dinamiku rada elektrolizatora i gorivnih članaka za razmatrani slučaj A-3. Srednja snaga rada elektrolizatora je 59.02% kroz 5,295 radnih sati i 788 ciklusa uključivanja i isključivanja, što je uzrokovalo gubitak kapaciteta od 2.70%. Kao i za slučajeve A-1 i A-2, niske vrijednosti ukupnog broja radnih sati elektrolizatora su posljedica visoke razine stanja napunjenosti spremnika vodika kroz razmatrani vremenski period. FC je radio 2,247 radna sata uz 315 ciklusa uključivanja i isključivanja, što je uzrokovalo gubitak kapaciteta od 0.99%. Slika 6.40 prikazuje dinamiku gubitka kapaciteta elektrolizatora i FC-a. Tablica 6.9 prikazuje ključne pokazatelje performansi HRES-a.



Slika 6.39: Dinamika rada elektrolizatora i gorivnog članka, razmatrani slučaj A-3



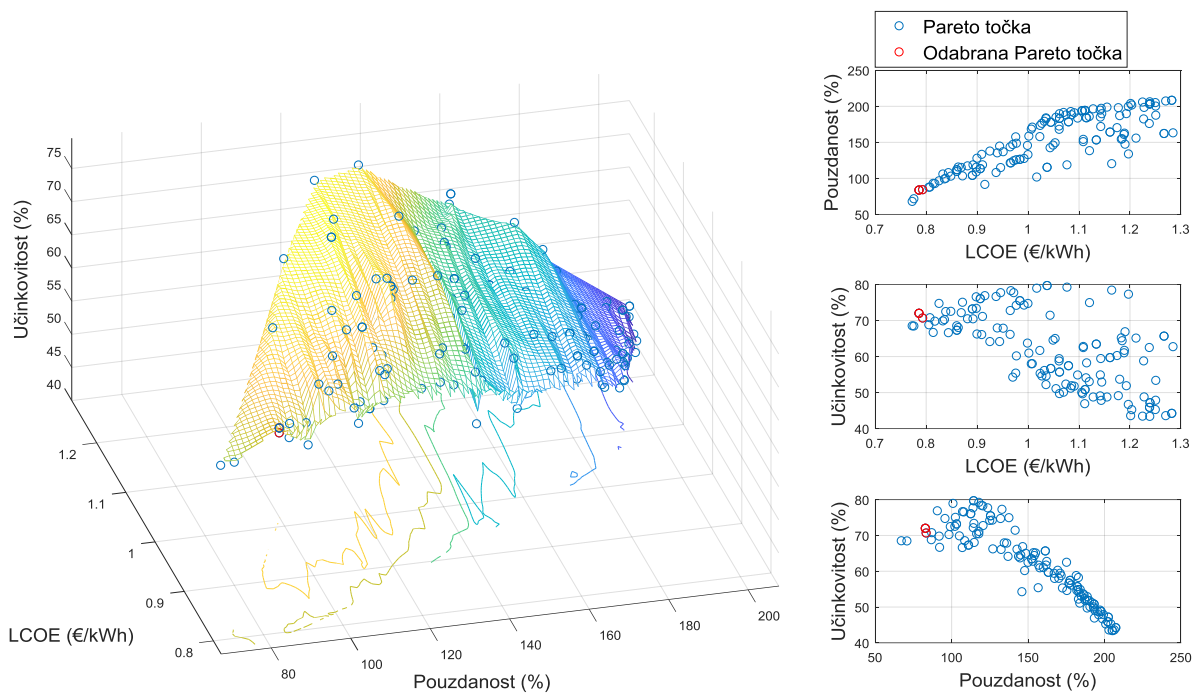
Slika 6.40: Dinamika gubitka kapaciteta elektrolizatora i gorivnog članka, razmatrani slučaj A-3

Tablica 6.9: Ključni pokazatelji performansi rada HRES-a za razmatrani slučaj A-3

Komponenta	Radni parametar		
Baterija	Prosječni životni vijek	9.42	godina
	Broj zamjena	2	–
	Prosječno vrijednost $SoC_{BT}$	82.30	%
Elektrolizator	Prosječna relativna radna snaga	59.02	%
	Preostali kapacitet na kraju razmatranog vremenskog perioda	97.30	%
	Ukupno radno vrijeme	5,295	h
	Ukupan broj uključivanja	788	–
	Prosječno radno vrijeme po uključivanju	6.72	h
Gorivni članak	Prosječna relativna radna snaga	51.46	%
	Preostali kapacitet na kraju razmatranog vremenskog perioda	99.01	%
	Ukupno radno vrijeme	2,247	h
	Ukupan broj uključivanja	315	–
	Prosječno radno vrijeme po uključivanju	7.45	h

#### 6.1.4. Rezultati razmatranog slučaja B-1

Slika 6.41 prikazuje Pareto granicu optimalnih rješenja razmatranog slučaja B-1, a tablica 6.10 prikazuje kriterije po kojima je izvršen izbor Pareto rješenja i ukupna broj rješenja za različite domene. Tablica 6.11 prikazuje rezultate funkcija cilja i dimenzionirane vrijednosti komponenata sustava izabranih rješenja za razmatrani slučaj B-1, od kojih je za daljnju analizu izabrano rješenje br. 1.



Slika 6.41: Pareto granica optimalnih rješenja za razmatrani slučaj B-1

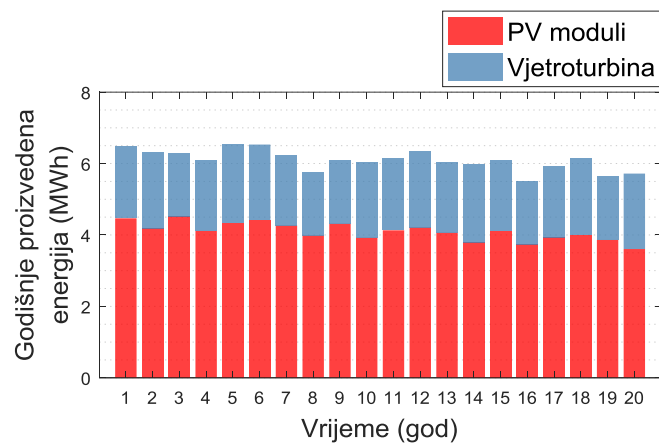
Tablica 6.10: Prikaz kriterija izbora Pareto rješenja za razmatrani slučaj B-1

$\eta_s$ (%)	SR (%)	LCOE (€/kWh)						
		< 0.75	< 0.80	< 0.85	< 0.90	< 0.95	< 1.00	< 1.05
> 50%	> 50%	0	5	15	27	38	51	67
	> 70%	0	4	14	26	37	50	66
	> 90%	0	0	8	20	31	44	60
	> 110%	0	0	0	7	16	29	44
> 60%	> 50%	0	5	15	27	38	49	56
	> 70%	0	4	14	26	37	48	55
	> 90%	0	0	8	20	31	42	49
	> 110%	0	0	0	7	16	27	33
> 70%	> 50%	0	3	8	16	22	29	34
	> 70%	0	<b>3</b>	8	16	22	29	34
	> 90%	0	0	4	12	18	25	30
	> 110%	0	0	0	4	8	15	19

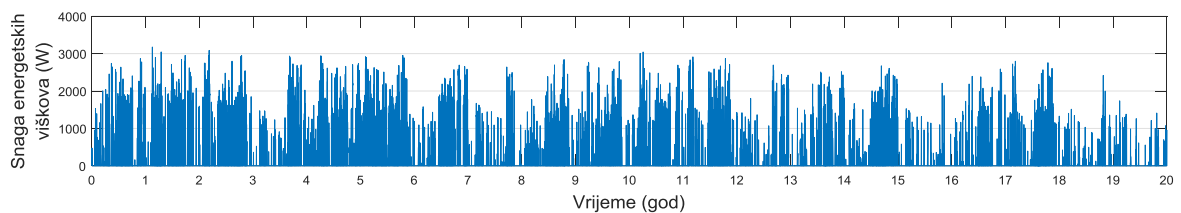
Tablica 6.11: Prikaz rezultata dimenzioniranja izabranih rješenja za razmatrani slučaj B-1

	$LCOE$ (€/kWh)	$SR$ (%)	$\eta_s$ (%)	$P_{PV,r}$ (W)	$P_{WT,r}$ (W)	$C_{BT,r}$ (kWh)	$P_{EL,r}$ (W)	$P_{FC,r}$ (W)	$V_{H_2,r}$ (m <sup>3</sup> )	$\beta$ (°C)	$y$ (m)
1.	0.787	83.13	71.87	2300	1100	43	1200	1200	0.65	42	19
2.	0.787	83.13	71.87	2300	1100	43	1200	1200	0.65	42	19
3.	0.794	83.64	70.56	2400	1100	43	1200	1200	0.65	45	18

Slika 6.42 prikazuje godišnju distribuciju proizvedene energije za razmatrani slučaj B-1. Prosječna godišnja proizvodnja energije iznosi 6,094.3 kWh, prosječna proizvedena energija prvih 5 godina razmatranog vremenskog perioda iznosi 6,338.9 kWh, dok prosječna proizvedena energija zadnjih 5 godina razmatranog vremenskog perioda iznosi 5,787.8 kWh. U usporedbi sa tri EMS-A razmatrana slučaja, slučaj B-1 je rezultirao manjim ukupnim instaliranim proizvodnim kapacitetom. Manji instalirani proizvodni kapacitet je rezultirao manjom ukupnom proizvedenom energijom, što je na kraju rezultiralo manjim energetske viškovima, slika 6.43, i boljom učinkovitošću sustava. Energetske potrebe opterećenja krajnjeg korisnika su zadovoljene izravno iz proizvedene OIE s 56.52% energije, 42.34% energetske potreba je zadovoljeno iz baterije, a 1.14% iz FC-a. Razmatrani slučaj B-1 je rezultirao s 13.36% neiskorištene energije.

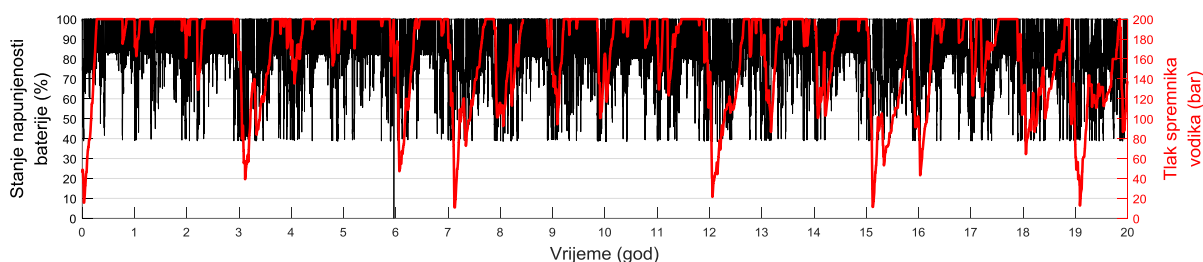


Slika 6.42: Godišnja distribucija proizvedene energije za razmatrani slučaj B-1



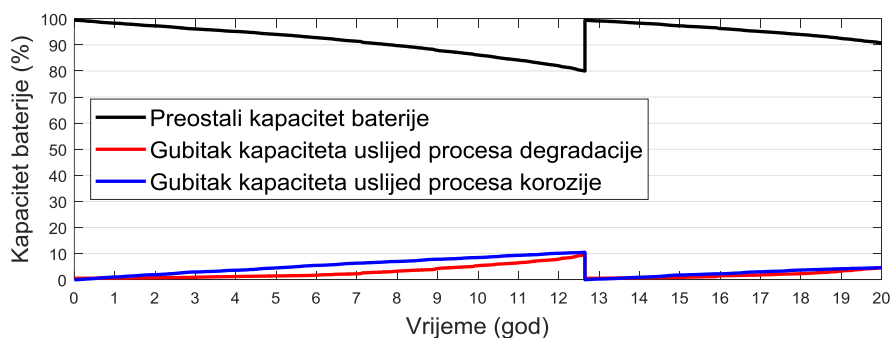
Slika 6.43: Neiskorištena energije, razmatrani slučaj B-1

Slika 6.44 prikazuje dinamiku punjenja i pražnjenja baterije i dinamiku proizvodnje i potrošnje vodika za razmatrani slučaj B-1. Prosječna vrijednost  $SoC_{BT}$  iznosi 82.80%, dok najniža vrijednost dubine pražnjenja u nijednom trenutku nije prešla vrijednost od 40%  $SoC_{BT}$ . Nadalje, u usporedbi sa slučajevima EMS-A, slučaj B-1 je rezultirao s učestalim korištenjem većine kapaciteta spremnika vodika, dok je tlak spremnika proveo 36.83% razmatranog vremenskog perioda pri nazivnom tlaku spremnika.

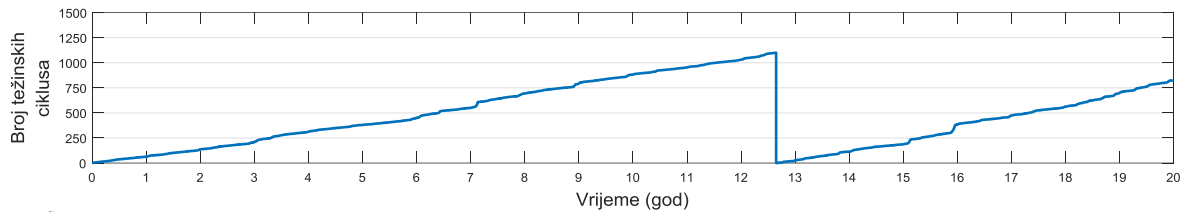


Slika 6.44: Ciklusi punjenja i pražnjenja baterije i dinamika proizvodnje i potrošnje vodika za razmatrani slučaj B-1

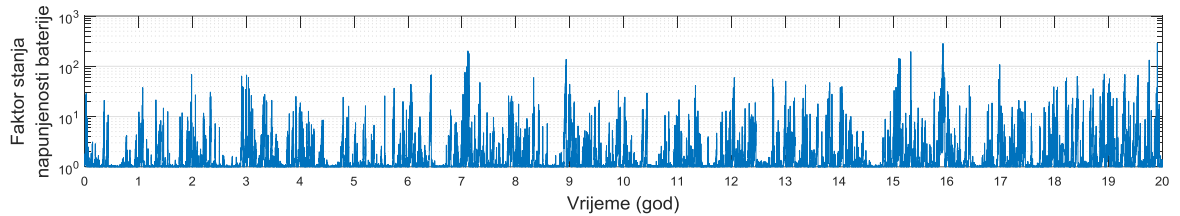
Slika 6.45 prikazuje dinamiku gubitka kapaciteta baterije. Za vrijeme razmatranog vremenskog perioda je izvršena jedna zamjena baterije uz postignuti životni vijek baterije od 12.65 godine. Utjecaj mehanizama degradacije aktivne mase i korozije efektivnog sloja su djelovalo podjednako na gubitak kapaciteta baterije. Baterija je rezultirala aktivnom dinamikom punjenja i pražnjenja tokom cijelog razmatranog vremenskog period, što je vidljivo iz dinamike faktora stanja napunjenosti baterije, slika 6.47, i faktora kiselinske stratifikacije, slika 6.50. Međutim, iako je baterija rezultirala većom aktivnošću punjenja i pražnjenja, u usporedbi s EMS-A slučajevima, mehanizam degradacije aktivne mase nije bio dominantniji od mehanizma korozije. Razlog tomu je što vrijednost  $SoC_{BT}$  prilikom pražnjenja nije padala ispod 40%, odnosno ispod  $FC_{low}$  (slika 4.2). Slike 6.46 do 6.50 prikazuju dinamiku utjecaja pojedinog faktora na proces degradacije aktivne mase, a slika 6.51 prikazuje dinamiku prirasta efektivne debljine korozivnog sloja uslijed procesa korozije za razmatrani slučaj B-1.



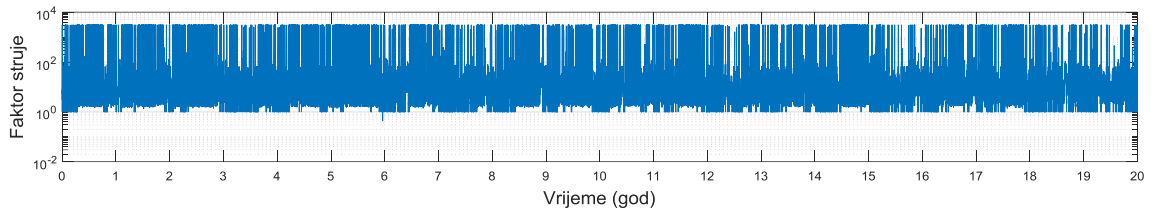
Slika 6.45: Dinamika gubitka kapaciteta baterije, razmatrani slučaj B-1



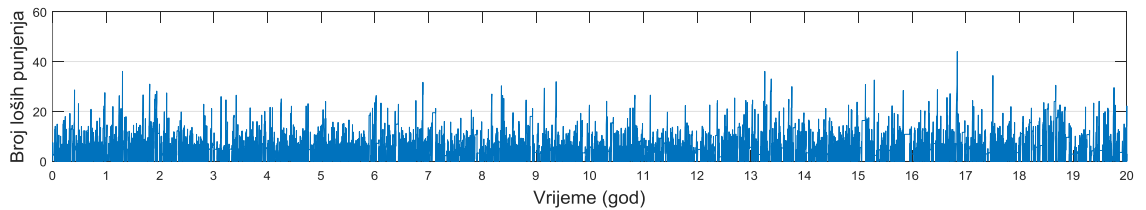
Slika 6.46: Dinamika prirasta težinskog broja ciklusa pražnjenja, razmatrani slučaj B-1



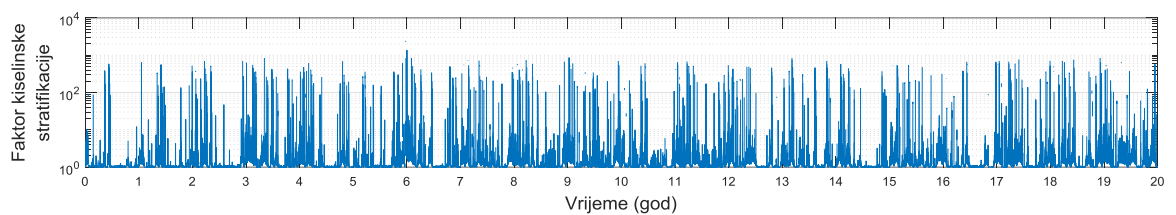
Slika 6.47: Dinamika faktora stanja napunjenosti baterije, razmatrani slučaj B-1



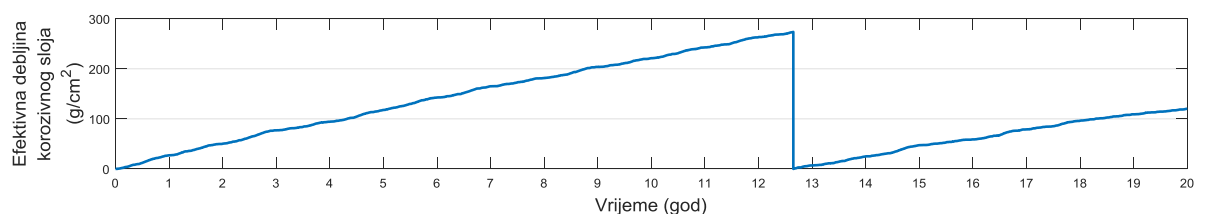
Slika 6.48: Dinamika faktora struje, razmatrani slučaj B-1



Slika 6.49: Dinamika prirasta broja loših punjenja baterije, razmatrani slučaj B-1



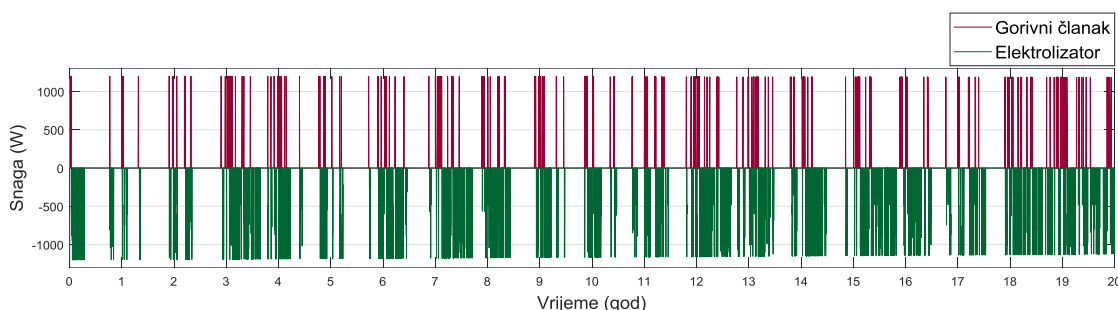
Slika 6.50: Dinamika faktora kiseline stratifikacije, razmatrani slučaj B-1



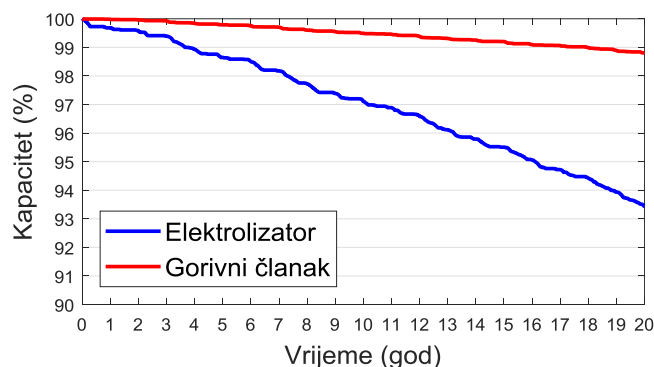
Slika 6.51: Dinamika prirasta efektivne debljine korozivnog sloja, razmatrani slučaj B-1

Slika 6.52 prikazuje dinamiku rada elektrolizatora i gorivnih članaka za razmatrani slučaj B-1. Srednja snaga rada elektrolizatora je 52.90% kroz 18,810 radnih sati i 1066 ciklusa uključivanja

i isključivanja, što je uzrokovalo gubitak kapaciteta od 6.38%. FC je radio 2,762 radna sata uz 407 ciklusa uključivanja i isključivanja, što je uzrokovalo gubitak kapaciteta od 1.19%. Slika 6.53 prikazuje dinamiku gubitka kapaciteta elektrolizatora i FC-a. Tablica 6.12 prikazuje ključne pokazatelje performansi HRES-a.



Slika 6.52: Dinamika rada elektrolizatora i gorivnog članka, razmatrani slučaj B-1



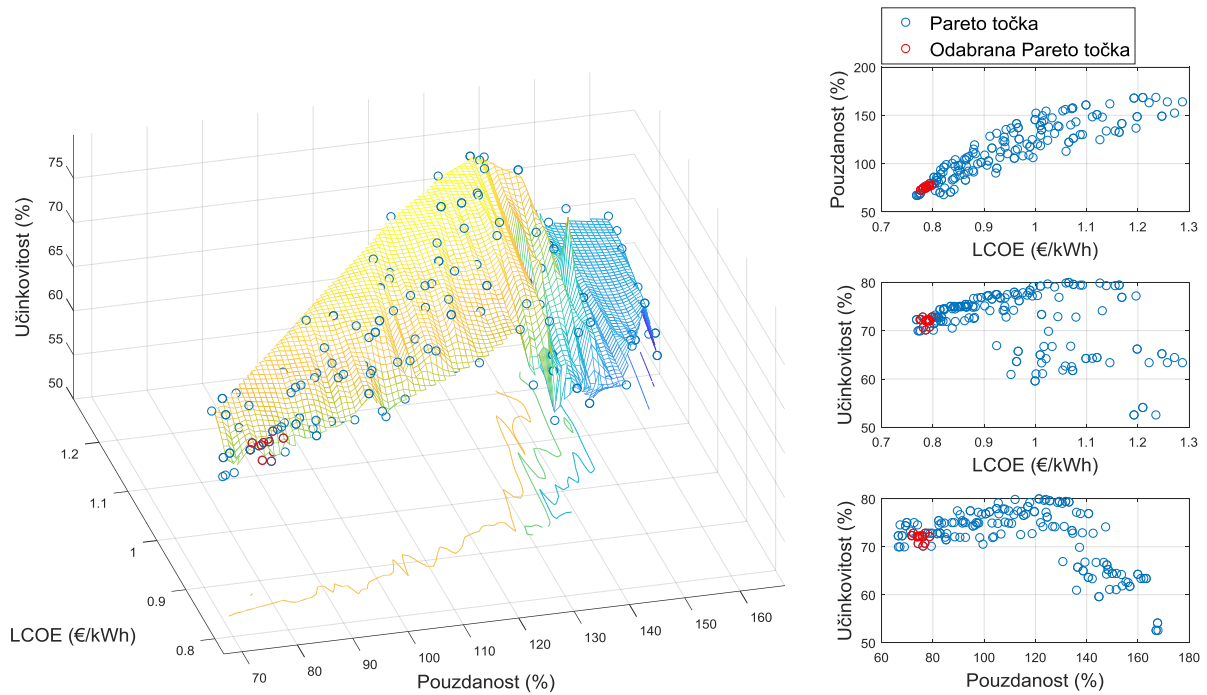
Slika 6.53: Dinamika gubitka kapaciteta elektrolizatora i gorivnog članka, razmatrani slučaj B-1

Tablica 6.12: Ključni pokazatelji performansi rada HRES-a za razmatrani slučaj B-1

Komponenta	Radni parametar		
Baterija	Prosječni životni vijek	12.65	godina
	Broj zamjena	1	–
	Prosječno vrijednost $SoC_{BT}$	82.80	%
Elektrolizator	Prosječna relativna radna snaga	52.90	%
	Preostali kapacitet na kraju razmatranog vremenskog perioda	93.42	%
	Ukupno radno vrijeme	18,810	h
	Ukupan broj uključivanja	1066	–
	Prosječno radno vrijeme po uključivanju	17.65	h
Gorivni članak	Prosječna relativna radna snaga	85.41	%
	Preostali kapacitet na kraju razmatranog vremenskog perioda	98.81	%
	Ukupno radno vrijeme	2,762	h
	Ukupan broj uključivanja	407	–
	Prosječno radno vrijeme po uključivanju	6.79	h

### 6.1.5. Rezultati razmatranog slučaja B-2

Slika 6.54 prikazuje Pareto granicu optimalnih rješenja razmatranog slučaja B-2, a tablica 6.13 prikazuje kriterije po kojima je izvršen izbor Pareto rješenja i ukupna broj rješenja za različite domene. Tablica 6.14 prikazuje rezultate funkcija cilja i dimenzionirane vrijednosti komponenata sustava izabranih rješenja za razmatrani slučaj B-2, od kojih je za daljnju analizu izabrano rješenje br. 2.



Slika 6.54: Pareto granica optimalnih rješenja za razmatrani slučaj B-2

Tablica 6.13: Prikaz kriterija izbora Pareto rješenja za razmatrani slučaj B-2

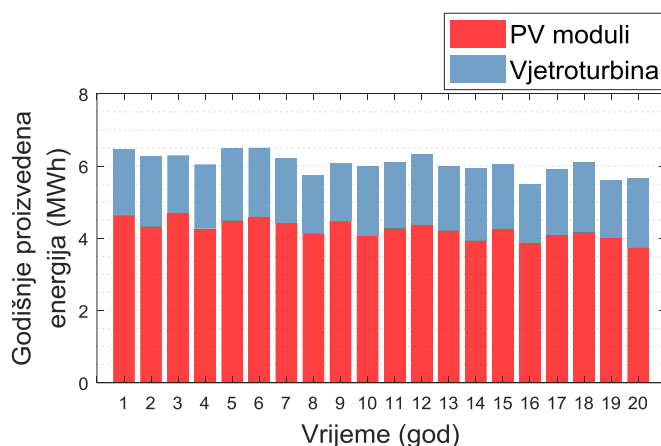
$\eta_s$ (%)	SR (%)	LCOE (€/kWh)						
		< 0.75	< 0.80	< 0.85	< 0.90	< 0.95	< 1.00	< 1.05
> 50%	> 50%	0	20	53	75	94	113	133
	> 70%	0	13	43	65	84	103	123
	> 90%	0	0	9	27	45	64	84
	> 110%	0	0	0	3	13	27	47
> 60%	> 50%	0	20	53	75	94	113	131
	> 70%	0	13	43	65	84	103	121
	> 90%	0	0	9	27	45	64	82
	> 110%	0	0	0	3	13	27	45
> 70%	> 50%	0	17	50	72	90	104	113
	> 70%	0	<b>13</b>	43	65	83	97	106
	> 90%	0	0	9	27	44	58	67
	> 110%	0	0	0	3	12	21	30



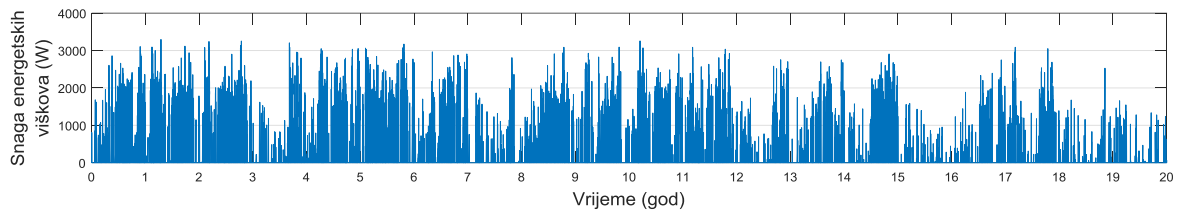
Tablica 6.14: Prikaz rezultata dimenzioniranja izabranih rješenja za razmatrani slučaj B-2

	LCOE (€/kWh)	SR (%)	$\eta_s$ (%)	$P_{PV,r}$ (W)	$P_{WT,r}$ (W)	$C_{BT,r}$ (kWh)	$P_{EL,r}$ (W)	$P_{FC,r}$ (W)	$V_{H_2,r}$ (m <sup>3</sup> )	$\beta$ (°∠)	$y$ (m)
1.	0.794	77.08	70.64	2500	1000	42	1300	1300	0.65	46	18
2.	0.777	72.00	72.22	2400	1000	40	1300	1200	0.65	46	19
3.	0.787	74.53	72.01	2300	1100	40	1400	1300	0.65	44	19
4.	0.782	74.45	70.56	2400	1100	40	1200	1200	0.65	45	18
5.	0.777	72.00	72.22	2400	1000	40	1300	1200	0.65	46	19
6.	0.781	72.58	72.72	2500	900	40	1600	1300	0.70	46	18
7.	0.787	76.33	70.04	2400	1100	40	1300	1200	0.65	45	19
8.	0.799	77.20	72.72	2400	1000	43	1300	1300	0.70	46	18
9.	0.793	76.24	71.93	2300	1100	41	1300	1300	0.70	43	19
10.	0.789	75.01	72.13	2400	1000	41	1400	1200	0.70	45	19
11.	0.793	76.06	72.22	2400	1000	41	1500	1300	0.70	46	19
12.	0.787	74.04	71.97	2400	1000	41	1300	1200	0.70	43	19
13.	0.795	78.92	72.01	2300	1100	41	1600	1300	0.65	44	19

Slika 6.55 prikazuje godišnju distribuciju proizvedene energije za razmatrani slučaj B-2. Prosječna godišnja proizvodnja energije iznosi 6,064.6 kWh, prosječna proizvedena energija prvih 5 godina razmatranog vremenskog perioda iznosi 6,315.3 kWh, dok prosječna proizvedena energija zadnjih 5 godina razmatranog vremenskog perioda iznosi 5,750.9 kWh. Energetske potrebe opterećenja krajnjeg korisnika su zadovoljene izravno iz proizvedene OIE s 57.38% energije, 41.45% energetskih potreba je zadovoljeno iz baterije, a 1.17% iz FC-a. Razmatrani slučaj B-2 je rezultirao s 12.78% neiskorištene energije. Slika 6.56 prikazuje distribuciju neiskorištene energije.

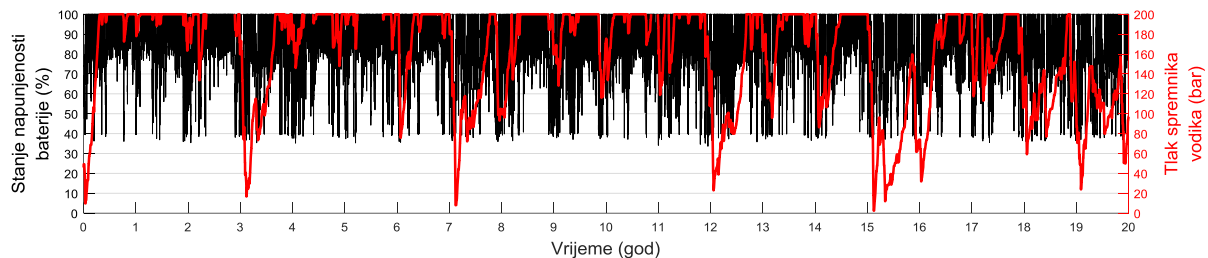


Slika 6.55: Godišnja distribucija proizvedene energije za razmatrani slučaj B-2



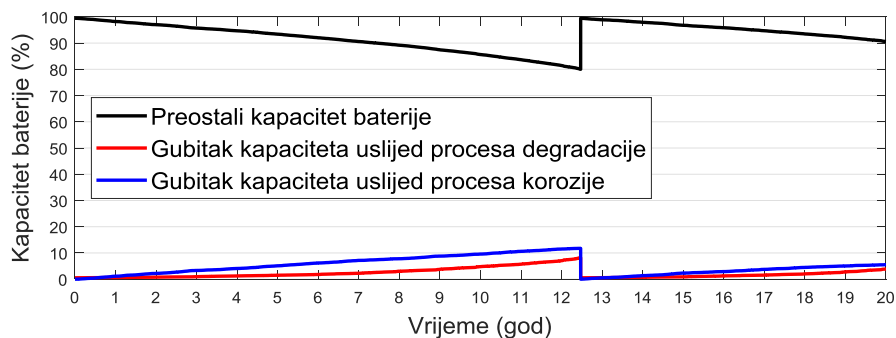
Slika 6.56: Neiskorištena energije, razmatrani slučaj B-2

Slika 6.57 prikazuje dinamiku punjenja i pražnjenja baterije i dinamiku proizvodnje i potrošnje vodika za razmatrani slučaj B-1. Prosječna vrijednost  $SoC_{BT}$  iznosi 81.87%. Kao i za slučaj B-2, sustav je aktivno koristio bateriju do 40%  $SoC_{BT}$ , bez većih dubina pražnjenja. Nadalje, slučaj B-2 je rezultirao s učestalim korištenjem većine kapaciteta spremnika vodika. Tlak spremnika je proveo 31.84% razmatranog vremenskog perioda pri nazivnom tlaku spremnika, dok je kroz razmatrani vremenski period spremnik vodika bio samo jednom potpuno ispražnjen.

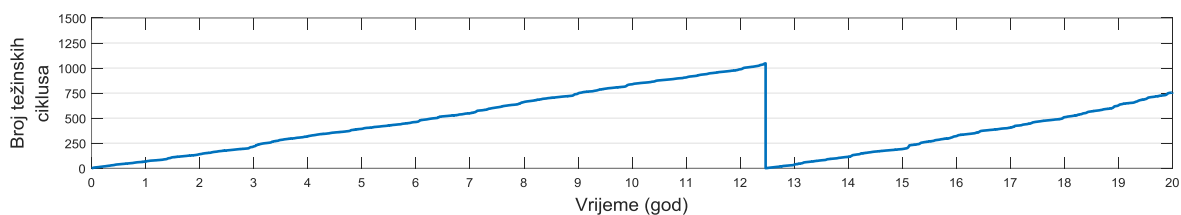


Slika 6.57: Ciklusi punjenja i pražnjenja baterije i dinamika proizvodnje i potrošnje vodika za razmatrani slučaj B-2

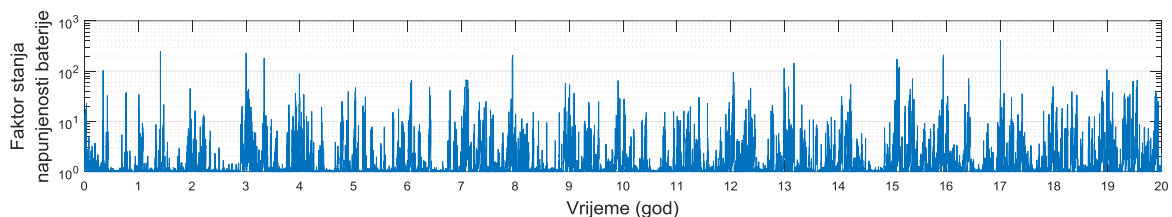
Slika 6.58 prikazuje dinamiku gubitka kapaciteta baterije. Za vrijeme razmatranog vremenskog perioda je izvršena jedna zamjena baterije uz postignuti životni vijek baterije od 12.47 godine. Iako je baterija ostvarila visoku aktivnost punjenja i pražnjenja u rasponu od  $EL_{up}$  do  $FC_{low}$ , gubitak kapaciteta baterije uslijed procesa korozije je rezultirao nešto dominantnije u odnosu na proces degradacije aktivne mase. Slično kao i za slučaj B-1, vrijednost  $SoC_{BT}$  za slučaj B-2 nije padala niže od 40% čime je izbjegnuto utjecaj dubokog pražnjenja baterije na proces degradacije aktivne mase. Slike 6.59 do 6.63 prikazuju dinamiku utjecaja pojedinog faktora na proces degradacije aktivne mase, a slika 6.64 prikazuje dinamiku prirasta efektivne debljine korozivnog sloja uslijed procesa korozije za razmatrani slučaj B-2.



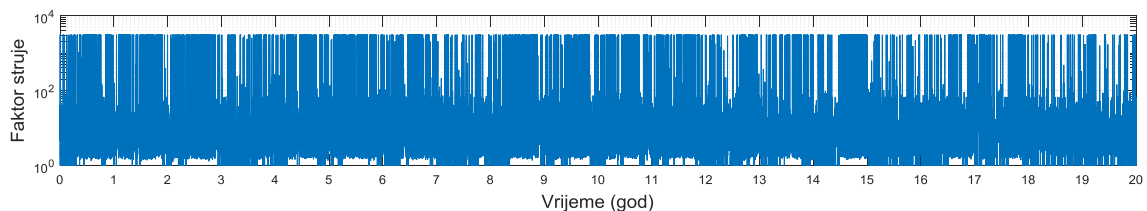
Slika 6.58: Dinamika gubitka kapaciteta baterije, razmatrani slučaj B-2



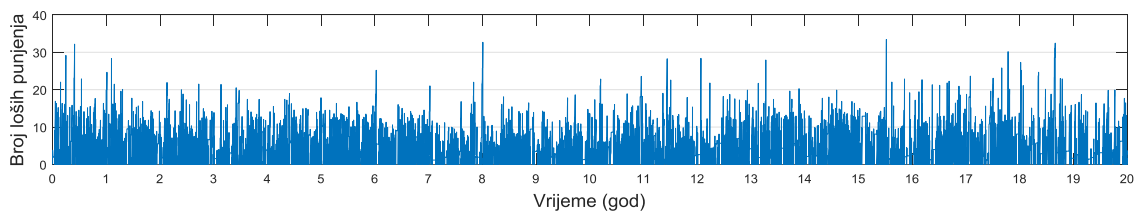
Slika 6.59: Dinamika prirasta težinskog broja ciklusa pražnjenja, razmatrani slučaj B-2



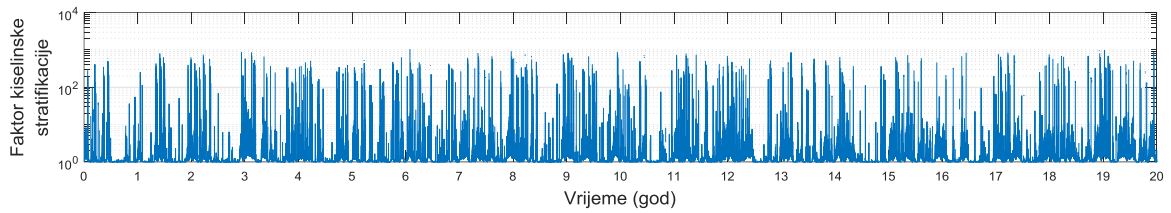
Slika 6.60: Dinamika faktora stanja napunjenosti baterije, razmatrani slučaj B-2



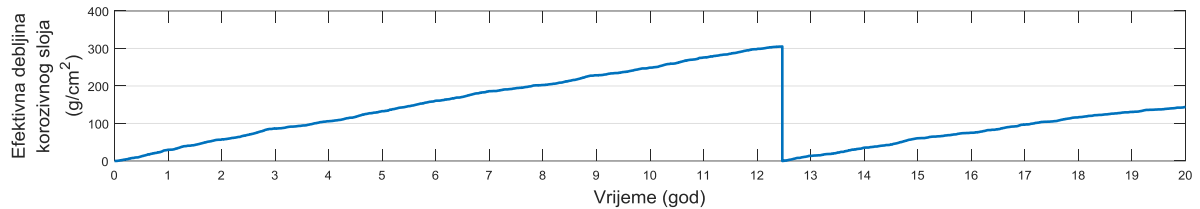
Slika 6.61: Dinamika faktora struje, razmatrani slučaj B-2



Slika 6.62: Dinamika prirasta broja loših punjenja baterije, razmatrani slučaj B-2

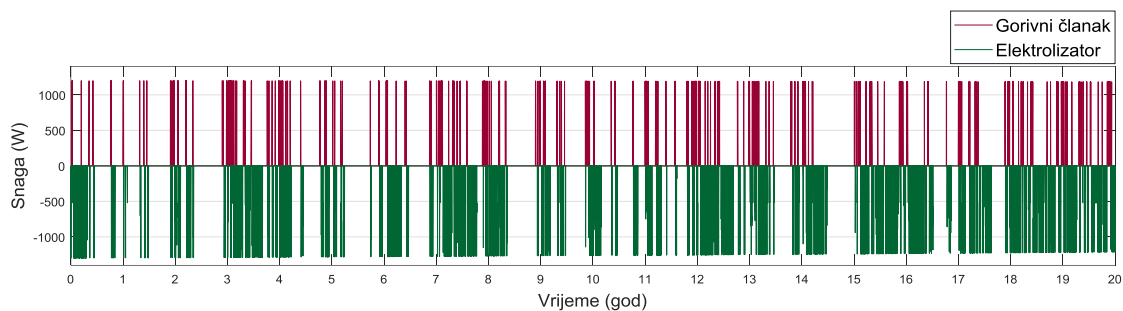


Slika 6.63: Dinamika faktora kiselinske stratifikacije, razmatrani slučaj B-2

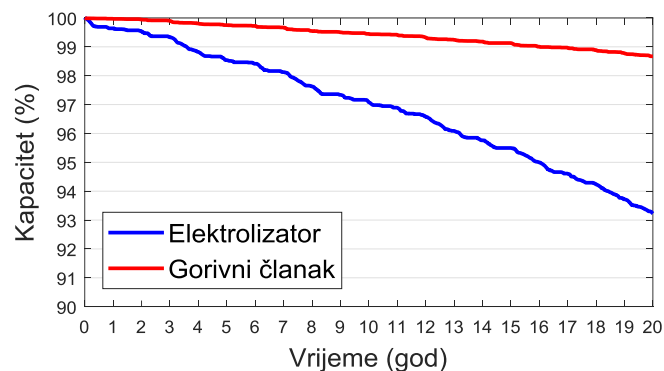


Slika 6.64: Dinamika prirasta efektivnog korozivnog sloja, razmatrani slučaj B-2

Slika 6.65 prikazuje dinamičnu radu elektrolizatora i gorivnih članaka za razmatrani slučaj B-2. Srednja snaga rada elektrolizatora je 52,01% kroz 18,315 radnih sati i 1,255 ciklusa uključivanja i isključivanja, što je uzrokovalo gubitak kapaciteta od 6,78%. FC je radio 3,078 radna sata uz 452 ciklusa uključivanja i isključivanja, što je uzrokovalo gubitak kapaciteta od 1,33%. Slika 6.66 prikazuje dinamičnu gubitka kapaciteta elektrolizatora i FC-a. Tablica 6.15 prikazuje ključne pokazatelje performansi HRES-a.



Slika 6.65: Dinamika rada elektrolizatora i gorivnog članka, razmatrani slučaj B-2



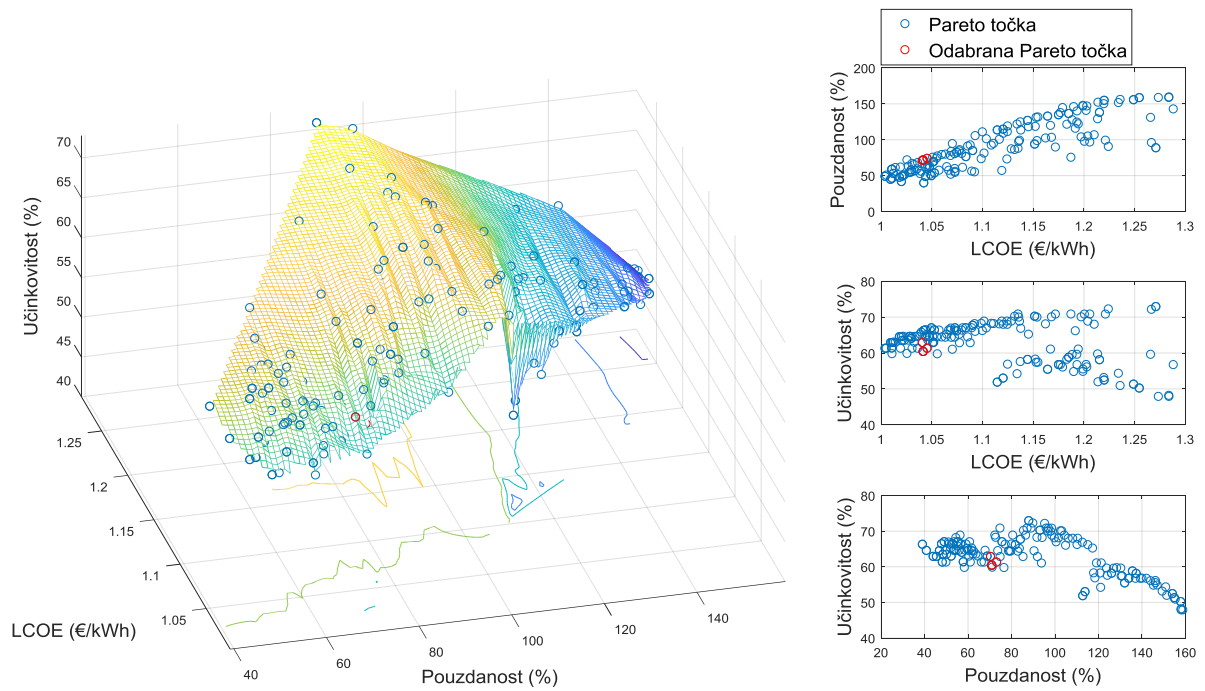
Slika 6.66: Dinamika gubitka kapaciteta elektrolizatora i gorivnog članka, razmatrani slučaj B-2

Tablica 6.15: Ključni pokazatelji performansi rada HRES-a za razmatrani slučaj B-2

Komponenta	Radni parametar		
Baterija	Prosječni životni vijek	12.47	godina
	Broj zamjena	1	–
	Prosječno vrijednost $SoC_{BT}$	81.87	%
Elektrolizator	Prosječna relativna radna snaga	52.01	%
	Preostali kapacitet na kraju razmatranog vremenskog perioda	93.22	%
	Ukupno radno vrijeme	18,315	h
	Ukupan broj uključivanja	1255	–
	Prosječno radno vrijeme po uključivanju	14.59	h
Gorivni članak	Prosječna relativna radna snaga	80.47	%
	Preostali kapacitet na kraju razmatranog vremenskog perioda	98.67	%
	Ukupno radno vrijeme	3,078	h
	Ukupan broj uključivanja	452	–
	Prosječno radno vrijeme po uključivanju	6.81	h

### 6.1.6. Rezultati razmatranog slučaja B-3

Slika 6.67 prikazuje Pareto granicu optimalnih rješenja razmatranog slučaja B-3, a tablica 6.16 prikazuje kriterije po kojima je izvršen izbor Pareto rješenja i ukupna broj rješenja za različite domene. Tablica 6.17 prikazuje rezultate funkcija cilja i dimenzionirane vrijednosti komponenata sustava izabranih rješenja za razmatrani slučaj B-3, od kojih je za daljnju analizu izabrano rješenje br. 1.



Slika 6.67: Pareto granica optimalnih rješenja za razmatrani slučaj B-3

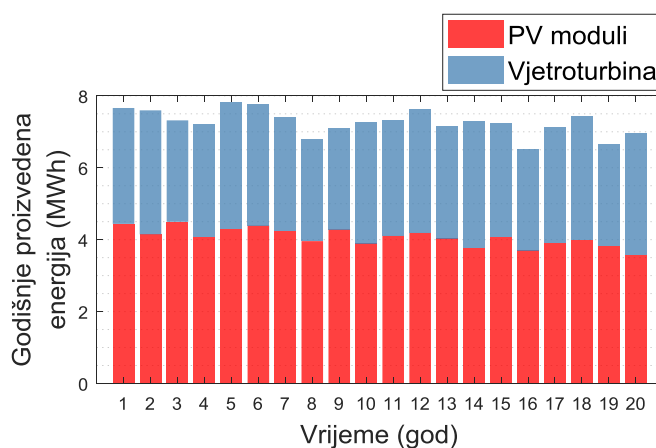
Tablica 6.16: Prikaz kriterija izbora Pareto rješenja za razmatrani slučaj B-3

$\eta_s$ (%)	SR (%)	LCOE (€/kWh)						
		< 0.75	< 0.80	< 0.85	< 0.90	< 0.95	< 1.00	< 1.05
> 50%	> 50%	0	0	0	0	0	0	33
	> 70%	0	0	0	0	0	0	5
	> 90%	0	0	0	0	0	0	0
	> 110%	0	0	0	0	0	0	0
> 60%	> 50%	0	0	0	0	0	0	31
	> 70%	0	0	0	0	0	0	4
	> 90%	0	0	0	0	0	0	0
	> 110%	0	0	0	0	0	0	0
> 70%	> 50%	0	0	0	0	0	0	0
	> 70%	0	0	0	0	0	0	0
	> 90%	0	0	0	0	0	0	0
	> 110%	0	0	0	0	0	0	0

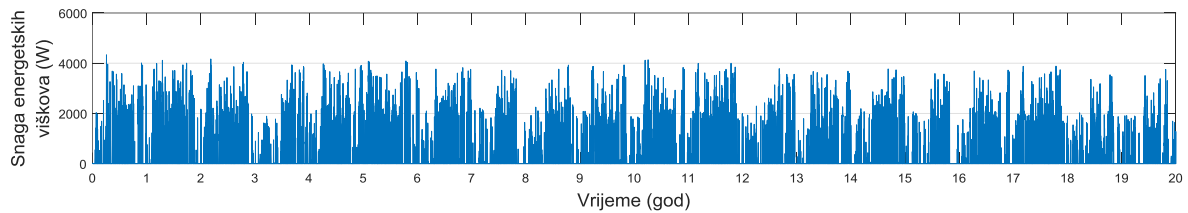
Tablica 6.17: Prikaz rezultata dimenzioniranja izabranih rješenja za razmatrani slučaj B-3

	$LCOE$ (€/kWh)	$SR$ (%)	$\eta_s$ (%)	$P_{PV,r}$ (W)	$P_{WT,r}$ (W)	$C_{BT,r}$ (kWh)	$P_{EL,r}$ (W)	$P_{FC,r}$ (W)	$V_{H_2,r}$ (m <sup>3</sup> )	$\beta$ (° $\angle$ )	$y$ (m)
1.	1.042	71.13	60.29	2300	1800	52	1800	1300	0.90	46	18
2.	1.046	73.35	61.18	2100	1900	54	1400	1300	1.00	47	19
3.	1.041	70.54	62.77	2100	1800	53	1600	1300	1.05	47	19
4.	1.042	71.13	60.29	2300	1800	52	1800	1300	0.90	46	18

Slika 6.68 prikazuje godišnju distribuciju proizvedene energije za razmatrani slučaj B-3. Prosječna godišnja proizvodnja energije iznosi 7,264,6 kWh, prosječna proizvedena energija prvih 5 godina razmatranog vremenskog perioda iznosi 7,522.1 kWh, dok prosječna proizvedena energija zadnjih 5 godina razmatranog vremenskog perioda iznosi 6,940.5 kWh. U usporedbi s razmatranim slučajevima B-1 i B-2, slučaj B-3 je rezultirao sa povećanjem instaliranog kapaciteta za proizvodnju energije. Za razliku od razmatranog slučaja A-3, slučaj B-3 je rezultirao s vrijednostima kuta nagiba PV modula kao i prethodna dva EMS-B slučaja, što upućuje da je sezonska varijacija impulsnog opterećenja (slika 3.10) imala manji utjecaj na EMS-B. Međutim, kako bi se postigla što bolja izravna isporuka proizvedene energije krajnjem korisniku za vrijeme noćnih sati, slučaj B-3 je rezultirao većim vrijednostima instaliranog kapaciteta vjetroturbine, u usporedbi sa slučajevima B-1 i B-2. Energetske potrebe opterećenja krajnjeg korisnika su zadovoljene izravno iz proizvedene OIE s 35.40% energije, 62.83% energetskih potreba je zadovoljeno iz baterije, a 1.77% iz FC-a. Kao i za slučaj A-3, upotreba baterije za zadovoljavanje potreba krajnjeg korisnika je značajno povišena, u usporedbi sa svim ostalim razmatranim slučajevima. Povećani instalirani proizvodni kapacitet je također rezultirao i povećanjem neiskorištene energije, slika 6.69, u odnosu na slučajeve B-1 i B-2. Razmatrani B-3 slučaj je rezultirao s 21.95% neiskorištene energije.

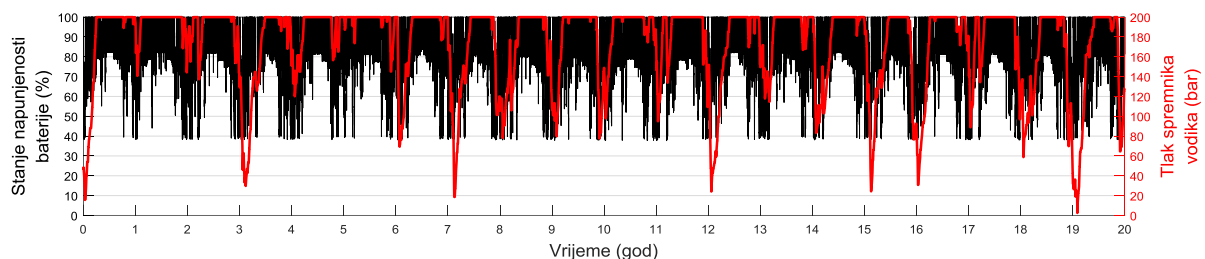


Slika 6.68: Godišnja distribucija proizvedene energije za razmatrani slučaj B-3



Slika 6.69: Neiskorištena energije, razmatrani slučaj B-3

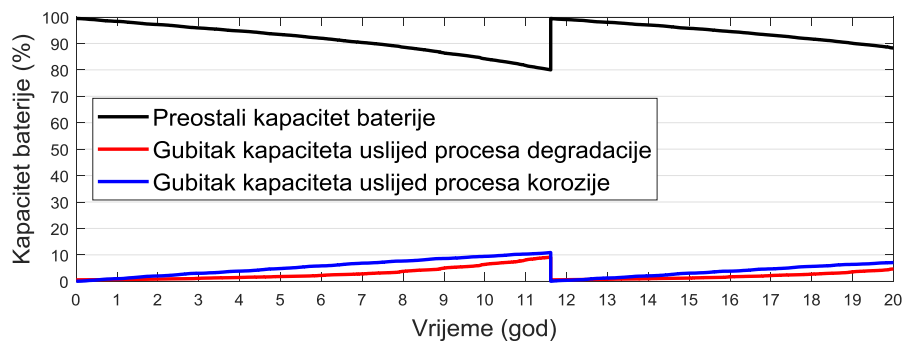
Slika 6.70 prikazuje dinamiku punjenja i pražnjenja baterije i dinamiku proizvodnje i potrošnje vodika za razmatrani slučaj B-3. Prosječna vrijednost  $SoC_{BT}$  iznosi 83.67%, dok su se dubine pražnjenja do 40%  $SoC_{BT}$  odvijala pretežito za vrijeme zimskih mjeseci. Za vrijeme ljetnih mjeseci  $SoC_{BT}$  je varirao u rasponu od 100% do 70%. Razlog tomu je povišena proizvodnja energije, kojom je  $SoC_{BT}$  održavan na visokoj razini. Povišena proizvodnja energije (u usporedbi sa slučajevima B-1 i B-2) je također utjecala na razinu skladištenog vodika. Iako je sustav uspješno koristio cijeli kapacitet spremnika vodika u nekoliko navrata tokom razmatranog vremenskog perioda, tlak spremnika je proveo 48.13% razmatranog vremenskog perioda pri nazivnom tlaku spremnika.



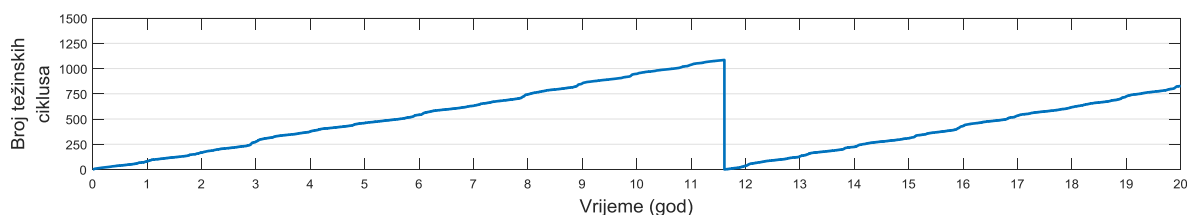
Slika 6.70: Ciklusi punjenja i pražnjenja baterije i dinamika proizvodnje i potrošnje vodika za razmatrani slučaj B-3

Slika 6.71 prikazuje dinamiku gubitka kapaciteta baterije. Za vrijeme razmatranog vremenskog perioda je izvršena jedna zamjena baterije uz postignuti životni vijek baterije od 11.61 godine. Utjecaj mehanizama degradacije aktivne mase i korozije efektivnog sloja su djelovali podjednako na gubitak kapaciteta baterije. Kao i za prethodna dva EMS-B slučaja,  $SoC_{BT}$  je uspješno održavano poviše  $FC_{low}$  kroz cijeli razmatrani vremenski period. Međutim, uslijed veće količine energije koja je prošla kroz bateriju, baterija je rezultirala nešto kraćim životnim vijekom, u usporedbi sa slučajevima B-1 i B-2. Slike 6.72 do 6.76 prikazuju dinamiku utjecaja pojedinog faktora na proces degradacije aktivne mase, a slika 6.77 prikazuje dinamiku prirasta efektivne debljine korozivnog sloja uslijed procesa korozije za razmatrani slučaj B-3.

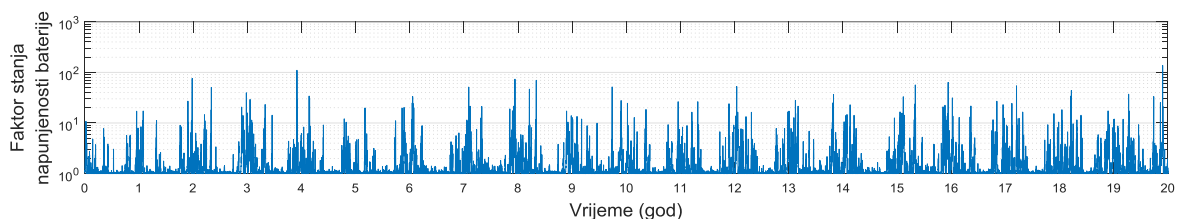




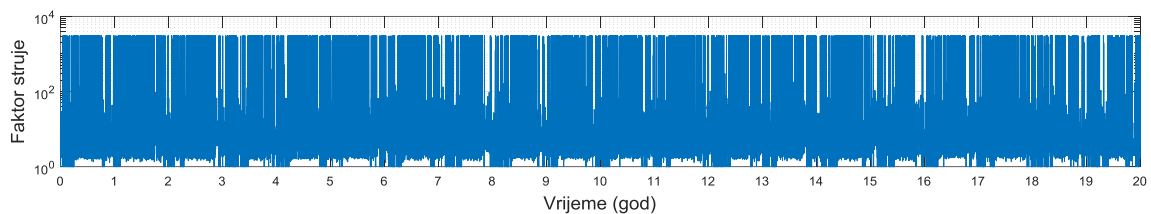
Slika 6.71: Dinamika gubitka kapaciteta baterije, razmatrani slučaj B-3



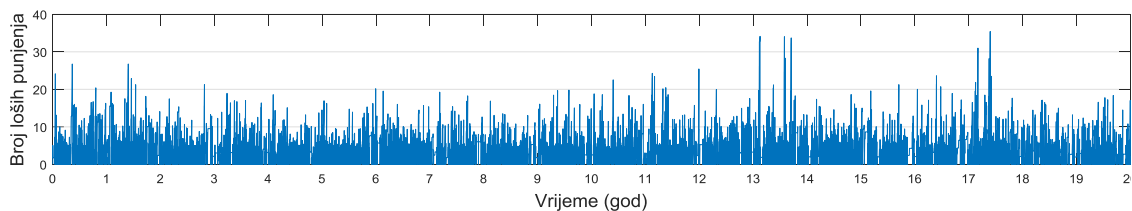
Slika 6.72: Dinamika prirasta težinskog broja ciklusa pražnjenja, razmatrani slučaj B-3



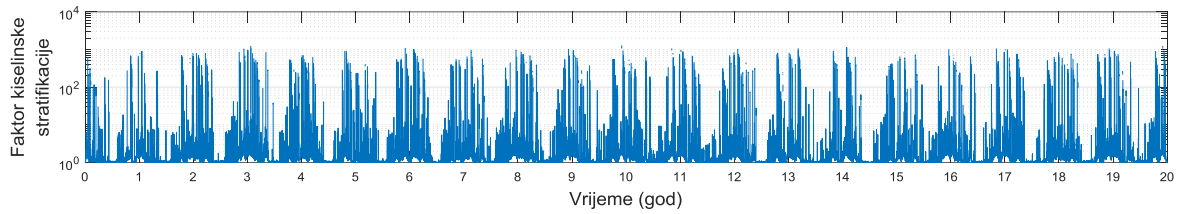
Slika 6.73: Dinamika faktora stanja napunjenosti baterije, razmatrani slučaj B-3



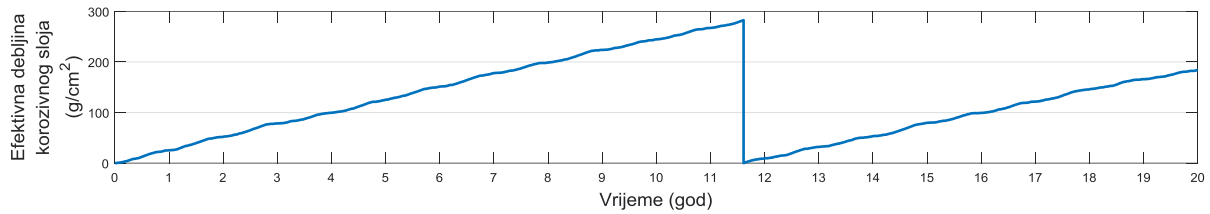
Slika 6.74: Dinamika faktora struje, razmatrani slučaj B-3



Slika 6.75: Dinamika prirasta broja loših punjenja baterije, razmatrani slučaj B-3

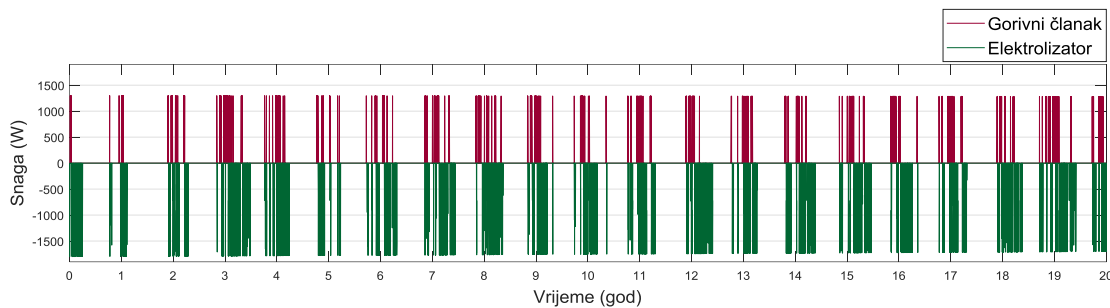


Slika 6.76: Dinamika faktora kiselinske stratifikacije, razmatrani slučaj B-3

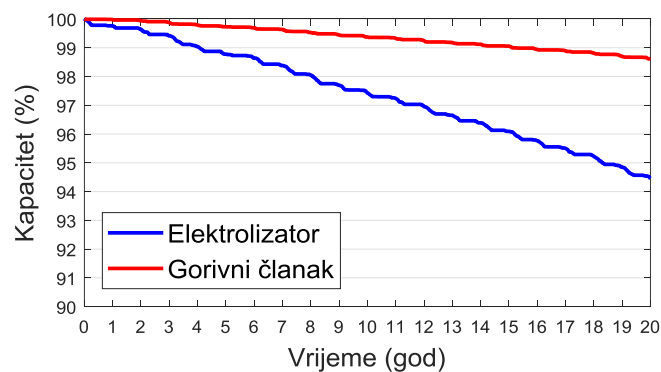


Slika 6.77: Dinamika prirasta efektivnog korozivnog sloja, razmatrani slučaj B-3

Slika 6.78 prikazuje dinamiku rada elektrolizatora i gorivnih članaka za razmatrani slučaj B-2. Srednja snaga rada elektrolizatora je 57.58% kroz 15,931 radnih sati i 891 ciklus uključivanja i isključivanja, što je uzrokovalo gubitak kapaciteta od 5.55%. FC je radio 3,204 radna sata uz 474 ciklusa uključivanja i isključivanja, što je uzrokovalo gubitak kapaciteta od 1.39%. Slika 6.79 prikazuje dinamiku gubitka kapaciteta elektrolizatora i FC-a. Tablica 6.18 prikazuje ključne pokazatelje performansi HRES-a.



Slika 6.78: Dinamika rada elektrolizatora i gorivnog članka, razmatrani slučaj B-3



Slika 6.79: Dinamika gubitka kapaciteta elektrolizatora i gorivnog članka, razmatrani slučaj B-3

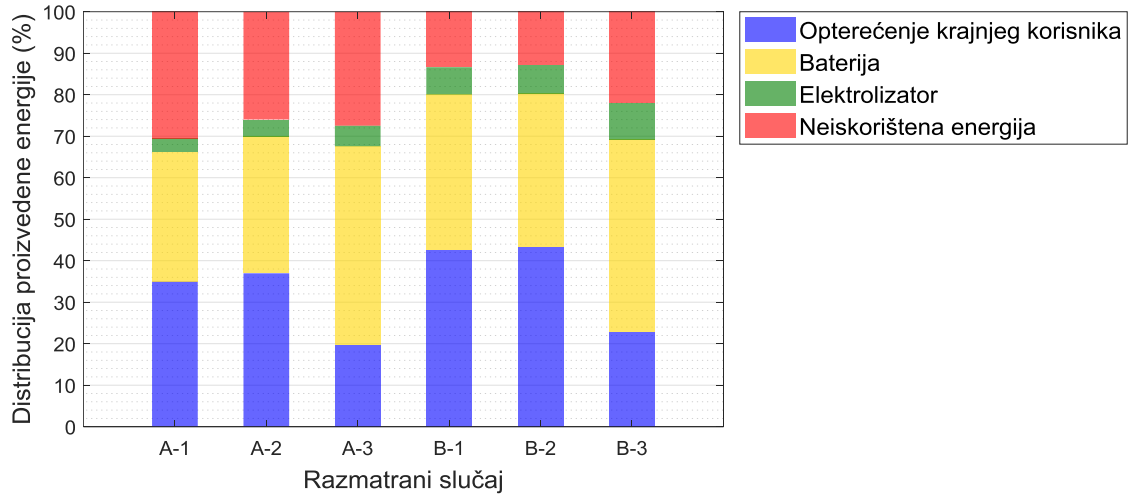
Tablica 6.18: Ključni pokazatelji performansi rada HRES-a za razmatrani slučaj B-3

Komponenta	Radni parametar		
Baterija	Prosječni životni vijek	11.61	godina
	Broj zamjena	1	–
	Prosječno vrijednost $SoC_{BT}$	83.67	%
Elektrolizator	Prosječna relativna radna snaga	57.58	%
	Preostali kapacitet na kraju razmatranog vremenskog perioda	94.45	%
	Ukupno radno vrijeme	15,931	h
	Ukupan broj uključivanja	891	–
	Prosječno radno vrijeme po uključivanju	17.86	h
Gorivni članak	Prosječna relativna radna snaga	93.31	%
	Preostali kapacitet na kraju razmatranog vremenskog perioda	98.61	%
	Ukupno radno vrijeme	3,204	h
	Ukupan broj uključivanja	474	–
	Prosječno radno vrijeme po uključivanju	6.76	h

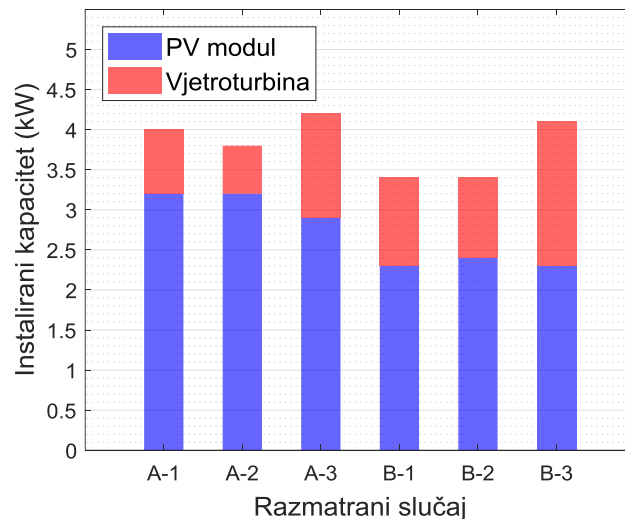
## 6.2. Diskusija

EMS-A slučajevi su, u odnosu na EMS-B slučajeve, rezultirali s većim vrijednostima neiskorištene energije, slika 6.80. Nadalje, EMS-B je također uspješnije izravno dostavljao proizvedenu energiju krajnjem korisniku, uz podjednako korištenja baterije kao izvora energije za zadovoljavanje potreba opterećenja krajnjeg korisnika. Visoke vrijednosti energetske viškova su također uzrokovane relativno visokim vrijednostima instaliranog proizvodnog kapaciteta, slika 6.81 (srednja snaga opterećenja iznosi 500 W, u ukupni proizvodni kapaciteti su dimenzionirani u rasponu od 3,400 W do 4,200 W). Međutim, visoke vrijednosti instaliranog PV/WT proizvodnog kapaciteta su rezultirale visokim vrijednostima srednje godišnje proizvedene energije (od 6,094.3 kWh do 7,264.8 kWh), u odnosu na godišnje energetske potrebe opterećenja krajnjeg korisnika (4,380 kWh), što je izravno utjecalo na životni vijek baterije za sve razmatrane slučajeve. Visoke vrijednosti proizvedene energije su održavale bateriju na visokim srednjim vrijednostima  $SoC_{BT}$ , što je izravno utjecalo na smanjenje utjecaja procesa degradacije aktivne mase, za sve razmatrane slučajeve. Nadalje, HRES je za sve razmatrane slučajeve u posljednjih 5 godina razmatranog vremenskog perioda uspješno zadovoljavao sve energetske potrebe krajnjeg korisnika, iako su vrijednosti nazivnih kapaciteta komponenata bile smanjene uslijed gubitka kapaciteta. To dokazuje da su vrijednosti HRES

komponentata na početku razmatranog vremenskog perioda dimenzionirane tako da se ostvari stabilan rad sustava na kraju razmatranog vremenskog perioda, nakon gubitka kapaciteta pojedinih komponentata.



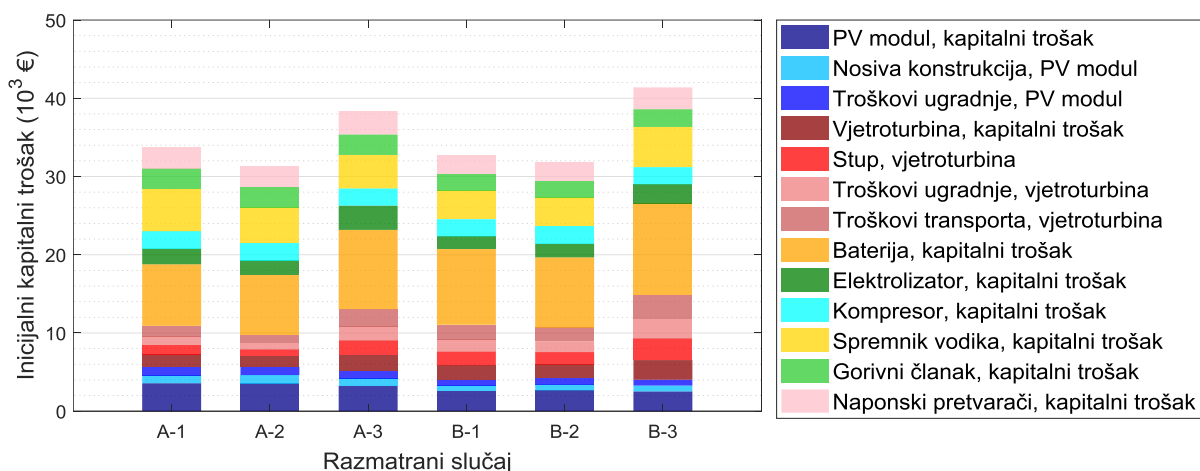
Slika 6.80: Distribucija proizvedene energije



Slika 6.81: Instalirani proizvodni kapacitet

Na dimenzioniranje komponentata je također utjecao i profil opterećenja, što je pogotovo izraženo slučajevima koji razmatraju impulsni profil opterećenja. Slučajevi koji razmatraju impulsni profil opterećenja su rezultirali s približno 15% većim kapacitetom baterije u odnosu na ostale slučajeve koji razmatraju istu EMS. Nadalje, slučajevi koji razmatraju impulsni profil opterećenja su također rezultirali i većim vrijednostima instalirane snage vjetroturbine. Osim razmatranih profila opterećenja, na dimenzioniranje PV/WT proizvodnog kapaciteta je također utjecao i inicijalni kapitalni trošak. Ukupni kapitalni trošak ugradnje PV modula iznosi približno 2,000 €/kW, dok ukupni kapitalni trošak ugradnje vjetroturbine iznosi približno

6,750 €/kW. Slika 6.82 prikazuje raspodjelu inicijalnih kapitalnih troškova za sve razmatrane slučajeve.



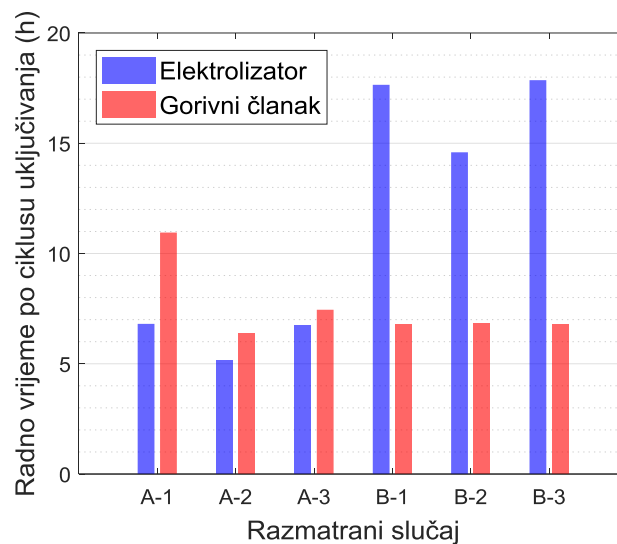
Slika 6.82: Raspodjela inicijalnih kapitalnih troškova

EMS-B je za sva tri razmatrana slučaja, u usporedbi s EMS-A slučajevima, ostvario bolje iskorištenje kapaciteta spremnika vodika. Bolje iskorištenje kapaciteta spremnika vodika je ostvareno većim brojem radnih sati elektrolizatora i FC-a, što je postignuto postavljenom EMS-B logikom. Učestalije korištenje FC-a je uspješno smanjilo ukupno vrijeme koje je spremnik vodika proveo pri nazivnom tlaku spremnika, sačuvalo bateriju od većih dubina pražnjenja i skratilo vrijeme pri nižim vrijednostima  $SoC_{BT}$ , čime se izravno utjecalo na životni vijek baterije. Pozitivan utjecaj korištenja FC-a za punjenje baterije u rasponu  $SoC_{BT}$  od  $FC_{low}$  do  $FC_{up}$  je vodljiv na slikama 6.47, 6.60 i 6.73 gdje vrijednosti faktora utjecaja  $SoC_{BT}$  u rijetkim slučajevima prelaze vrijednost 100, dok za sve EMS-A slučajeve faktor utjecaja  $SoC_{BT}$  u svim zimskim mjesecima rezultira vrijednostima od 1,000, slika 6.8, 6.21 i 6.34. Nadalje, EMS-A slučajevi također rezultiraju s povišenim utjecajem kiselinske stratifikacije, slika 6.11, 6.24 i 6.37, u odnosu na sve EMS-B slučajeve, slika 6.50, 6.63 i 6.76.

Iako je ukupan postignuti broj radnih sati FC-a rezultirao podjednakim vrijednostima za sve razmatrane slučajeve, EMS-B slučajevi su ostvarili prosječnu snagu rada FC-a od 80% do 95%, što je izravno utjecalo i na potrošnju vodika. EMS-A slučajevi su rezultirali s relativno niskom prosječnom radnom snagom FC-a, od 28% do 52%, što je izravno utjecalo na potrošnju vodika i mogućnost rada elektrolizatora. Nadalje, dimenzioniranje FC-a je rezultiralo relativno visokim nazivnim kapacitetima, za što nije bilo potrebe iz aspekta zadovoljavanja konstantnog i impulsnog profila opterećenja. Predimenzionirani FC kapacitet može predstavljati problem za EMS-A slučajeve iz aspekta mogućnosti zadovoljavanja opterećenja krajnjeg korisnika, jer što

je veća nazivna snaga FC-a to je i veći raspon snage u kojem je FC ograničen rad (0% do 10% relativne snage FC-a). s druge strane, za EMS-B slučajeve se veći nazivni kapacitet FC-a može pozitivno utjecati na pouzdanost sustava, jer većim kapacitetom FC-a se može ostvariti kraće vrijeme koje baterije provodi pri nižim vrijednostima  $SoC_{BT}$ .

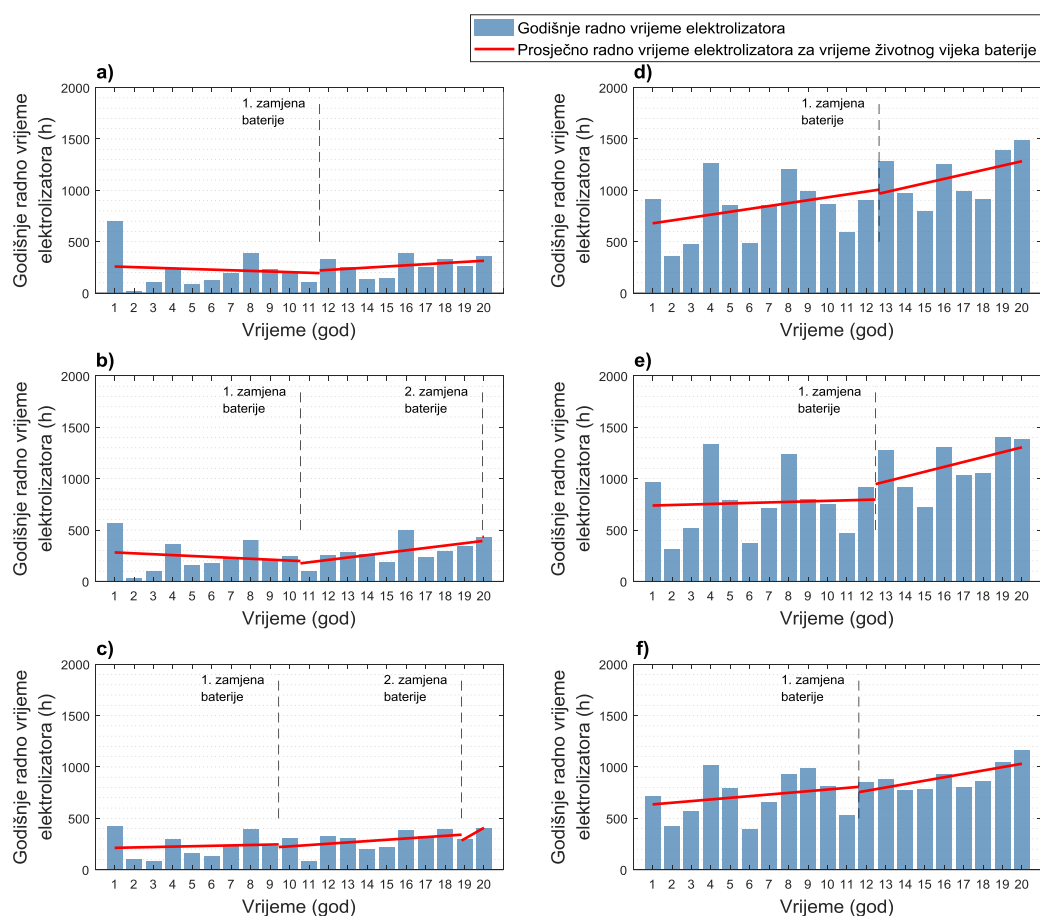
EMS-B je izravno utjecala na režim rada elektrolizatora, gdje je za sve razmatrane slučajeve postignut prosječno vrijeme rada elektrolizatora po ciklusu uključivanja poviše 14 sati, slika 6.83. Neometani rad elektrolizatora je ostvaren EMS-B logikom, gdje se rad elektrolizatora ne prekida u rasponu  $SoC_{BT}$  od  $EL_{low}$  do  $EL_{up}$ . Iako je raspon  $SoC_{BT}$  za rad elektrolizatora postavljen u osjetljivom  $SoC_{BT}$  području iz aspekta prirasta broja loših punjenja, EMS-B i rad elektrolizatora nisu imali nepovoljan utjecaj na životni vijek baterije, slika 6.49, 6.62 i 6.75. Iako su EMS-B slučajevi rezultirali većim brojem radnih sati i samim time veći padom kapaciteta elektrolizatora na kraju razmatranog vremenskog perioda, u usporedbi s EMS-A slučajevima, sa EMS-B se ostvaruje bolji režim rada elektrolizatora. EMS-B ostvaruje bolji režim rada elektrolizatora iz aspekta gubitka kapaciteta, jer je za jednaki broj radnih sati potreban manji broj ciklusa uključivanja i isključivanja koji imaju veći utjecaj na gubitak kapaciteta. Srednja vrijednost radnih sati FC-a po ciklusu uključivanja je rezultirao podjednako za sve razmatrane slučajeve.



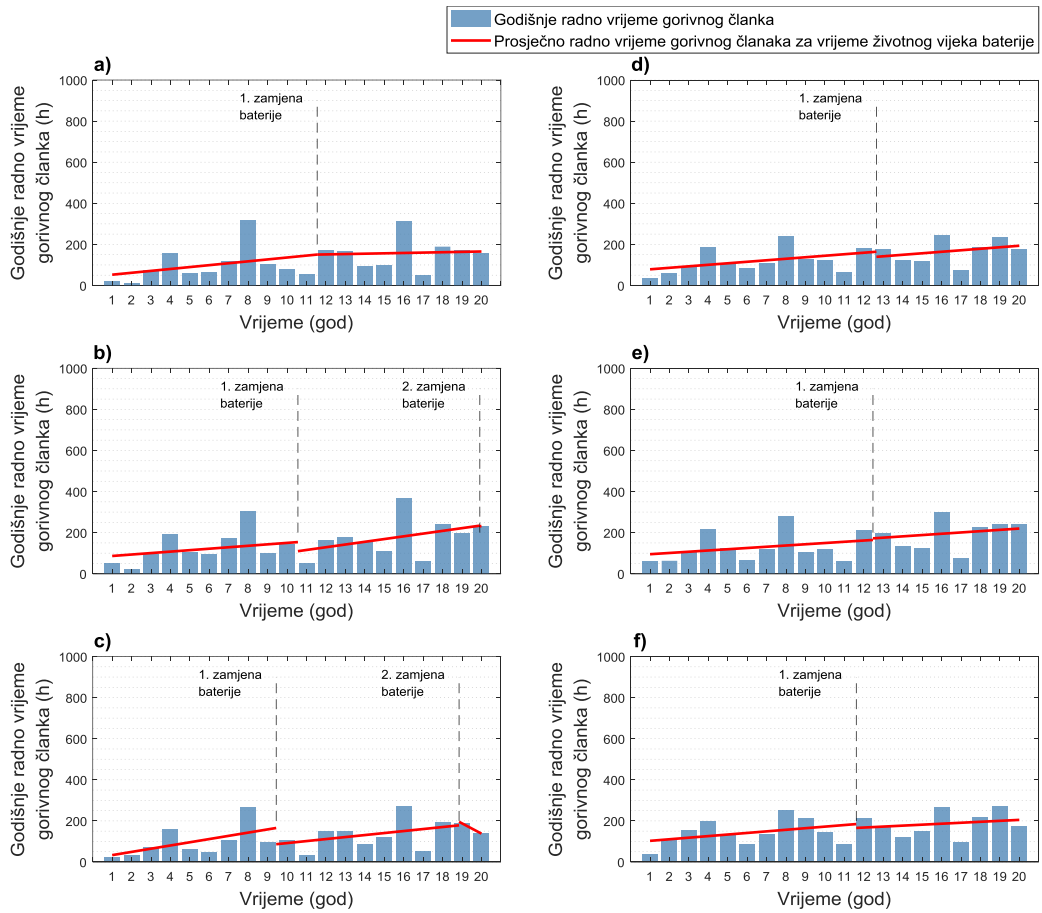
Slika 6.83: Srednje radno vrijeme elektrolizatora i gorivnih članaka po ciklusu uključivanja

Na režim rada elektrolizatora i FC-a je također utjecao gubitak kapaciteta PV modula i gubitak kapaciteta baterije. Slika 6.84 prikazuje godišnju distribuciju radnih sati elektrolizatora, a slika 6.85 godišnju distribuciju radnih sati FC-a. Razlike i oscilacije između ukupnih godišnjih radnih sati FC-a i između ukupnih godišnjih radnih sati elektrolizatora, za sve razmatrane

slučajeve, su pretežito uzrokovane neusklađenošću između profila proizvedene energije i profila opterećenja krajnjeg korisnika, jer je svaka godina razmatranog vremenskog perioda bila drugačije usklađena (ili neusklađena). Međutim, primjetan je trend porasta ukupnih godišnjih radnih sati FC-a i ukupnih godišnjih radnih sati elektrolizatora kroz razmatrani vremenski period. Postepeni pad proizvedene energije je uzrokovao učestalije korištenje baterije, a postepeno smanjenje kapaciteta baterije je uzrokovalo učestalije korištenje FC-a. Učestalijim korištenjem FC-a su konzumirane veće količine vodika, što je utjecalo na pad tlaka u spremniku vodika. EMS-A slučajevi su rezultirali s relativno dugim ukupnim vremenom koje bi spremnik vodika provodio pri nazivnom tlaku, što je onemogućavalo rad elektrolizatora. Rad elektrolizatora je bio manje pod utjecajem punog spremnika za EMS-B slučajeve, jer je FC redovito korišten za punjenje baterije što je rezultiralo manjim ukupnim vremenom koje je spremnik vodika proveo pri nazivnom tlaku. Gubitak kapaciteta PV modula i gubitak kapaciteta baterije je također utjecao i na smanjenje neiskorištene energije. Osim što je uslijed degradacije PV modula došlo smanjenja proizvedene energije, smanjenje neiskorištene energije je uzrokovan i učestalijim radom elektrolizatora.



Slika 6.84: Godišnja distribucija radnih sati elektrolizatora za: a) slučaj A-1; b) slučaj A-2; c) slučaj A-3; d) slučaj B-1; e) slučaj B-2; f) slučaj B-3



Slika 6.85: Godišnja distribucija radnih sati gorivnog članka za: a) slučaj A-1; b) slučaj A-2; c) slučaj A-3; d) slučaj B-1; e) slučaj B-2; f) slučaj B-3



## 7. ZAKLJUČAK

Ovim istraživanjem je izvršena analiza utjecaja dinamike gubitka kapaciteta na radne parametre PV/WT/BT/HS konfiguracije HRES-a, gdje su razmatrana tri različita profila opterećenja krajnjeg korisnika i dvije različite EMS. Uspješno je izvršena implementacija svih matematičkih modela radnih karakteristika sastavnih komponenata razmatrane HRES konfiguracije i matematičkih modela gubitka kapaciteta u programski paket MATLAB. Nadalje, uspješno su izrađeni algoritmi za generiranje stohastičkog i impulsnog profila opterećenja, modeli gubitka kapaciteta PEM elektrolizatora i PEM FC-a, te simulatori rada HRES-a prema logikama razmatranih EMS. Dimenzioniranje sustava je izvršeno višeciljnom optimizacijom korištenjem MATLAB GA Optimization Toolbox-a.

Pregledom literature je utvrđen nedostatak kod dostupnih istraživanja prilikom analize rada HRES-a iz aspekta razmatranja životnog vijeka komponenata sustava. Dostupna istraživanja često koriste komercijalne alate koji ne pružaju mogućnost analize na duže vremenske periode, te nisu dovoljno intuitivni, što uvelike ograničava mogućnost provođenja adekvatne analize rada sustava.

Rezultatima istraživanja je dokazan utjecaj EMS na dinamiku gubitka kapaciteta olovno-kiselinske baterije, PEM elektrolizatora i PEM FC-a. EMS-B je izravno utjecala na mehanizam degradacije aktivne mase upravljanjem FC-a, gdje je FC korišten za punjenje baterije, čime je skraćeno vrijeme pri nižim vrijednostima  $SoC_{BT}$  i smanjena dubina pražnjenja. EMS-B je također utjecala i na režim rada elektrolizatora i FC-a.

Analizom rezultata je ustanovljena izravna veza između dinamike gubitka kapaciteta PV modula i baterije na režim rada elektrolizatora i FC-a. Uslijed pada proizvodnje energije i smanjenja kapaciteta skladištenja, povećana je potreba za korištenjem FC-a. Nadalje, učestalijim korištenjem FC-a se izravno utjecalo na stanje napunjenosti spremnika vodika, što je omogućilo učestaliji rad elektrolizatora.

Rezultati su također pokazali utjecaj gubitka kapaciteta na dimenzioniranje inicijalnih kapaciteta komponenti sustava. Potreba za većim proizvodnim PV/WT kapacitetom i većim kapacitetom baterije je postignut stabilan rad sustava kroz razmatrani vremenski period. U posljednjim godinama razmatranog vremenskog perioda, za sve razmatrane slučajeve, sustav

uspješno radi s već smanjenim kapacitetima sastavnih komponenti, što dokazuje da bi i manji kapacitet bio dostatan na početku životnog vijeka za zadovoljavanje potreba opterećenja krajnjeg korisnika. Međutim, tako dimenzionirani sustav bi bio u mogućnosti zadovoljavati sve energetske potrebe opterećenja kroz ostatak razmatranog vremenskog perioda. Ispravnim dimenzioniranjem kapaciteta komponenata se izravno utjecalo na dinamiku gubitka kapaciteta, a dinamika gubitka kapaciteta na dimenzioniranje sustava.

### **7.1. Buduća istraživanja**

Smjernice za buduća istraživanja mogu biti usmjerena prema razmatranju utjecaja dinamike gubitka kapaciteta na radne parametre drugih HRES konfiguracijama. Jedna takva HRES konfiguracija je PV/WT/BT/DG, gdje se može razmatrati utjecaj gubitka kapaciteta PV modula i olovno-kiselinskih baterija na potrošnju goriva prilikom rada DG i samim time porast CO<sub>2</sub> emisija kroz razmatrani vremenski period. Drugi primjer je konfiguracija sustava u obliku punionice vodika s proizvodnjom vodika iz OIE, gdje se može razmatrati utjecaj gubitka kapaciteta PEM elektrolizatora na cijenu vodika.

Jedna od smjernica istraživanja može biti usmjerena na razvoj novih EMS sa sezonski promjenjivim parametrima upravljanja za bolje prilagođavanje profilu opterećenja krajnjeg korisnika i profilu proizvodnje energije.

## Literatura

- [1] REN21, *Renewables 2022 Global status report*. 2022.
- [2] A. C. Duman and Ö. Güler, “Techno-economic analysis of off-grid PV/wind/fuel cell hybrid system combinations with a comparison of regularly and seasonally occupied households,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 42, pp. 107–126, 2018.
- [3] A. Bianchini *et al.*, “Current status and grand challenges for small wind turbine technology,” *Wind Energy Sci.*, vol. 7, no. 5, pp. 2003–2037, 2022.
- [4] M. Bortolini, M. Gamberi, A. Graziani, R. Manzini, and F. Pilati, “Performance and viability analysis of small wind turbines in the European Union,” *Renew. Energy*, vol. 62, pp. 629–639, 2014.
- [5] M. H. Athari and M. M. Ardehali, “Operational performance of energy storage as function of electricity prices for on-grid hybrid renewable energy system by optimized fuzzy logic controller,” *Renew. Energy*, vol. 85, pp. 890–902, 2016.
- [6] P. García-Triviño, L. M. Fernández-Ramírez, A. J. Gil-Mena, F. Llorens-Iborra, C. A. García-Vázquez, and F. Jurado, “Optimized operation combining costs, efficiency and lifetime of a hybrid renewable energy system with energy storage by battery and hydrogen in grid-connected applications,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 48, pp. 23132–23144, 2016.
- [7] M. Rouholamini and M. Mohammadian, “Heuristic-based power management of a grid-connected hybrid energy system combined with hydrogen storage,” *Renew. Energy*, vol. 96, pp. 354–365, 2016.
- [8] M. S. Behzadi and M. Niasati, “Comparative performance analysis of a hybrid PV/FC/battery stand-alone system using different power management strategies and sizing approaches,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 1, pp. 538–548, 2014.
- [9] A. Poullikkas, “A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 27, pp. 778–788, 2013.
- [10] M. Hossain, S. Mekhilef, and L. Olatomiwa, “Performance evaluation of a stand-alone PV-wind-diesel-battery hybrid system feasible for a large resort center in South China Sea, Malaysia,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 28, pp. 358–366, 2017.
- [11] M. J. Khan, A. K. Yadav, and L. Mathew, “Techno economic feasibility analysis of different combinations of PV-Wind- Diesel-Battery hybrid system for telecommunication applications in different cities of Punjab , India,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, pp. 577–607, 2017.
- [12] K. Karakoulidis, K. Mavridis, D. V Bandekas, P. Adoniadis, C. Potolias, and N. Vordos, “Techno-economic analysis of a stand-alone hybrid photovoltaic-diesel e battery-fuel cell power system,” *Renew. Energy*, vol. 36, no. 8, pp. 2238–2244, 2011.
- [13] H. R. Baghaee, M. Mirsalim, G. B. Gharehpetian, and H. A. Talebi, “Reliability/cost-based multi-objective Pareto optimal design of stand-alone wind/PV/FC generation

- microgrid system,” *Energy*, vol. 115, pp. 1022–1041, 2016.
- [14] C. Ghenai, T. Salameh, and A. Merabet, “Technico-economic analysis of off grid solar PV/Fuel cell energy system for residential community in desert region,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 20, pp. 11460–11470, 2018.
- [15] A. Khan and N. Javaid, “Optimal sizing of a stand-alone photovoltaic, wind turbine and fuel cell systems,” *Comput. Electr. Eng.*, vol. 85, p. 106682, 2020.
- [16] S. Rahimi, M. Meratizaman, S. Monadizadeh, and M. Amidpour, “Techno-economic analysis of wind turbine-PEM (polymer electrolyte membrane) fuel cell hybrid system in standalone area,” *Energy*, vol. 67, pp. 381–396, 2014.
- [17] V. M. Sanchez, A. U. Chavez-Ramirez, S. M. Duron-Torres, J. Hernandez, L. G. Arriaga, and J. M. Ramirez, “Techno-economical optimization based on swarm intelligence algorithm for a stand-alone wind-photovoltaic-hydrogen power system at south-east region of Mexico,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 29, pp. 16646–16655, 2014.
- [18] F. Barbir, *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*, 2nd ed. Elsevier Academic Press, 2012.
- [19] F. Barbir, “PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources,” *Sol. Energy*, vol. 78, no. 5, pp. 661–669, 2005.
- [20] J. Šimunović, F. Barbir, G. Radica, and B. Klarin, “Techno-economic analysis of PV/wind turbine stand-alone energy system,” *IEEE Split. 2019*, 2019.
- [21] C.-H. Li, X.-J. Zhu, G.-Y. Cao, S. Sui, and M.-R. Hu, “Dynamic modeling and sizing optimization of stand-alone photovoltaic power systems using hybrid energy storage technology,” *Renew. Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 815–826, 2009.
- [22] A. Cano, F. Jurado, H. Sánchez, L. M. Fernández, and M. Castañeda, “Optimal sizing of stand-alone hybrid systems based on PV/WT/FC by using several methodologies,” *J. Energy Inst.*, vol. 87, no. 4, pp. 330–340, 2014.
- [23] M. Castañeda, A. Cano, F. Jurado, H. Sánchez, and L. M. Fernández, “Sizing optimization, dynamic modeling and energy management strategies of a stand-alone PV/hydrogen/battery-based hybrid system,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 10, pp. 3830–3845, 2013.
- [24] V. Dash and P. Bajpai, “Power management control strategy for a stand-alone solar photovoltaic-fuel cell-battery hybrid system,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 9, pp. 68–80, 2015.
- [25] P. García, J. P. Torreglosa, L. M. Fernández, and F. Jurado, “Optimal energy management system for stand-alone wind turbine/photovoltaic/hydrogen/battery hybrid system with supervisory control based on fuzzy logic,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 33, pp. 14146–14158, 2013.
- [26] P. García, J. P. Torreglosa, L. M. Fernández, and F. Jurado, “Improving long-term operation of power sources in off-grid hybrid systems based on renewable energy, hydrogen and battery,” *J. Power Sources*, vol. 265, pp. 149–159, 2014.
- [27] S. G. Tesfahunegn, Ø. Ulleberg, P. J. S. Vie, and T. M. Undeland, “Optimal shifting of Photovoltaic and load fluctuations from fuel cell and electrolyzer to lead acid battery in a Photovoltaic/hydrogen standalone power system for improved performance and life time,” *J. Power Sources*, vol. 196, no. 23, pp. 10401–10414, 2011.

- [28] J. P. Torreglosa, P. García, L. M. Fernández, and F. Jurado, “Hierarchical energy management system for stand-alone hybrid system based on generation costs and cascade control,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 77, pp. 514–526, 2014.
- [29] J. P. Torreglosa, P. García, L. M. Fernández, and F. Jurado, “Energy dispatching based on predictive controller of an off-grid wind turbine/photovoltaic/hydrogen/battery hybrid system,” *Renew. Energy*, vol. 74, pp. 326–336, 2015.
- [30] Internet, “<http://www.trnsys.com/>.” .
- [31] Internet, “<https://sel.me.wisc.edu/trnsys/features/features.html>.” .
- [32] K. Zhou, J. A. Ferreira, and S. W. H. de Haan, “Optimal energy management strategy and system sizing method for stand-alone photovoltaic-hydrogen systems,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 2, pp. 477–489, 2008.
- [33] Ø. Ulleberg, “The importance of control strategies in PV-hydrogen systems,” *Sol. Energy*, vol. 76, no. 1–3, pp. 323–329, 2004.
- [34] M. Kilic and A. F. Altun, “Dynamic modelling and multi-objective optimization of off-grid hybrid energy systems by using battery or hydrogen storage for different climates,” *Int. J. Hydrogen Energy*, 2023.
- [35] E. Ozden and I. Tari, “PEM fuel cell degradation effects on the performance of a stand-alone solar energy system,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 18, pp. 13217–13225, 2017.
- [36] D. Bezmalinović, F. Barbir, and I. Tolj, “Techno-economic analysis of PEM fuel cells role in photovoltaic-based systems for the remote base stations,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 1, pp. 417–425, 2013.
- [37] R. Lacko, B. Drobnič, M. Sekavčnik, and M. Mori, “Hydrogen energy system with renewables for isolated households: The optimal system design, numerical analysis and experimental evaluation,” *Energy Build.*, vol. 80, pp. 106–113, 2014.
- [38] V. Suresh, M. Muralidhar, and R. Kiranmayi, “Modelling and optimization of an off-grid hybrid renewable energy system for electrification in a rural areas,” *Energy Reports*, vol. 6, pp. 594–604, 2020.
- [39] A. Shaqour, H. Farzaneh, Y. Yoshida, and T. Hinokuma, “Power control and simulation of a building integrated stand-alone hybrid PV-wind-battery system in Kasuga City, Japan,” *Energy Reports*, vol. 6, pp. 1528–1544, 2020.
- [40] W. Wu, V. I. Christiana, S.-A. Chen, and J.-J. Hwang, “Design and techno-economic optimization of a stand-alone PV (photovoltaic)/FC (fuel cell)/battery hybrid power system connected to a wastewater-to-hydrogen processor,” *Energy*, vol. 84, pp. 462–472, 2015.
- [41] D. Ipsakis, S. Voutetakis, and P. Seferlis, “Power management strategies for a stand-alone power system using renewable energy sources and hydrogen storage,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 16, pp. 7081–7095, 2009.
- [42] V. Dash and P. Bajpai, “Power management control strategy for a stand-alone solar photovoltaic-fuel cell-battery hybrid system,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 9, no. 1, pp. 68–80, 2015.
- [43] R. Yumurtaçi, “Role of energy management in hybrid renewable energy systems: case

- study-based analysis considering varying seasonal conditions,” *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 21, pp. 1077–1091, 2013.
- [44] K. Anoune, M. Bouya, A. Astito, and A. Ben, “Sizing methods and optimization techniques for PV-wind based hybrid renewable energy system: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 93, pp. 652–673, 2018.
- [45] S. R. Tito, T. T. Lie, and T. N. Anderson, “Optimal sizing of a wind-photovoltaic-battery hybrid renewable energy system considering socio-demographic factors,” *Sol. Energy*, vol. 136, pp. 525–532, 2016.
- [46] E. Dursun and O. Kilic, “Comparative evaluation of different power management strategies of a stand-alone PV/Wind/PEMFC hybrid power system,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 34, no. 1, pp. 81–89, 2012.
- [47] P. Marocco, D. Ferrero, A. Lanzini, and M. Santarelli, “Optimal design of stand-alone solutions based on RES + hydrogen storage feeding off-grid communities,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 238, p. 114147, 2021.
- [48] Y. Zhang, Q. S. Hua, L. Sun, and Q. Liu, “Life Cycle Optimization of Renewable Energy Systems Configuration with Hybrid Battery / Hydrogen Storage: A Comparative Study,” *J. Energy Storage*, vol. 30, no. February, p. 101470, 2020.
- [49] M. Sarvi and I. N. Avanaki, “An optimized Fuzzy Logic Controller by Water Cycle Algorithm for power management of Stand-alone Hybrid Green Power generation,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 106, pp. 118–126, 2015.
- [50] R. Hosseinalizadeh, H. S. G, and M. Sadegh, “Economic sizing of a hybrid (PV–WT–FC) renewable energy system (HRES) for stand-alone usages by an optimization-simulation model: Case study of Iran,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 54, pp. 139–150, 2016.
- [51] H. M. Cano, S. Kelouwani, K. Agbossou, and Y. Dubé, “Power management system for off-grid hydrogen production based on uncertainty,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, pp. 7260–7272, 2015.
- [52] J. Voisin, M. Darnon, A. Jaouad, M. Volatier, V. Aimez, and J. P. Trovão, “Energy & Buildings Climate impact analysis on the optimal sizing of a stand-alone hybrid building,” *Energy Build.*, vol. 210, p. 109676, 2020.
- [53] W. Zhang, A. Maleki, M. A. Rosen, and J. Liu, “Sizing a stand-alone solar-wind-hydrogen energy system using weather forecasting and a hybrid search optimization algorithm,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 180, pp. 609–621, 2019.
- [54] I. Firtina-ertis, C. Acar, and E. Erturk, “Optimal sizing design of an isolated stand-alone hybrid wind-hydrogen system for a zero-energy house,” *Appl. Energy*, vol. 274, p. 115244, 2020.
- [55] E. L. V. Eriksson and E. M. Gray, “Optimization of renewable hybrid energy systems - A multi-objective approach,” *Renew. Energy*, vol. 133, pp. 971–999, 2019.
- [56] G. Cau, D. Cocco, M. Petrollese, S. Knudsen, and C. Milan, “Energy management strategy based on short-term generation scheduling for a renewable microgrid using a hydrogen storage system,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 87, pp. 820–831, 2014.
- [57] D. Ipsakis, S. Voutetakis, P. Seferlis, F. Stergiopoulos, S. Papadopoulou, and C.

- Elmasides, “The effect of the hysteresis band on power management strategies in a stand-alone power system,” *Energy*, vol. 33, pp. 1537–1550, 2008.
- [58] D. Emad, M. A. El-Hameed, and A. A. El-Fergany, “Optimal techno-economic design of hybrid PV/wind system comprising battery energy storage : Case study for a remote area,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 249, p. 114847, 2021.
- [59] J. P. Torreglosa, P. García-Triviño, L. M. Fernández-Ramirez, and F. Jurado, “Control based on techno-economic optimization of renewable hybrid energy system for stand-alone applications,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 51, pp. 59–75, 2016.
- [60] R. Dufo-López, I. R. Cristóbal-Monreal, and J. M. Yusta, “Optimisation of PV-wind-diesel-battery stand-alone systems to minimise cost and maximise human development index and job creation,” *Renew. Energy*, vol. 94, pp. 280–293, 2016.
- [61] T. Ma and M. S. Javed, “Integrated sizing of hybrid PV-wind-battery system for remote island considering the saturation of each renewable energy resource,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 182, pp. 178–190, 2019.
- [62] W. Zhang, A. Maleki, and M. Alhuyi, “Optimal operation of a hydrogen station using multi-source renewable energy (solar/wind) by a new approach,” *J. Energy Storage*, vol. 53, p. 104983, 2022.
- [63] R. Babaei, D. S. Ting, and R. Carriveau, “Feasibility and optimal sizing analysis of stand-alone hybrid energy systems coupled with various battery technologies : A case study of Pelee Island,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 4747–4762, 2022.
- [64] X. Qi, J. Wang, G. Królczyk, P. Gardoni, and Z. Li, “Sustainability analysis of a hybrid renewable power system with battery storage for islands application,” *J. Energy Storage*, vol. 50, p. 104682, 2022.
- [65] R. Dufo-López, J. M. Lujano-Rojas, and J. L. Bernal-Agustín, “Comparison of different lead-acid battery lifetime prediction models for use in simulation of stand-alone photovoltaic systems,” *Appl. Energy*, vol. 115, pp. 242–253, 2014.
- [66] J. Schiffer, D. U. Sauer, H. Bindner, T. Cronin, P. Lundsager, and R. Kaiser, “Model prediction for ranking lead-acid batteries according to expected lifetime in renewable energy systems and autonomous power-supply systems,” *J. Power Sources*, vol. 168, pp. 66–78, 2007.
- [67] Y. He, S. Guo, P. Dong, C. Wang, J. Huang, and J. Zhou, “Techno-economic comparison of different hybrid energy storage systems for off-grid renewable energy applications based on a novel probabilistic reliability index,” *Appl. Energy*, vol. 328, p. 120225, 2022.
- [68] P. Rullo, L. Braccia, P. Luppi, D. Zumoffen, and D. Feroldi, “Integration of sizing and energy management based on economic predictive control for standalone hybrid renewable energy systems,” *Renew. Energy*, vol. 140, pp. 436–451, 2019.
- [69] P. Marocco, D. Ferrero, A. Lanzini, and M. Santarelli, “The role of hydrogen in the optimal design of off-grid hybrid renewable energy systems,” *J. Energy Storage*, vol. 46, p. 103893, 2022.
- [70] G. Human, G. Van Schoor, and K. R. Uren, “Power management and sizing optimisation of renewable energy hydrogen production systems,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 31, pp. 155–166, 2019.

- 
- [71] A. Mahesh and G. Sushnigdha, "Optimal sizing of photovoltaic/wind/battery hybrid renewable energy system including electric vehicles using improved search space reduction algorithm," *J. Energy Storage*, vol. 56, p. 105866, 2022.
- [72] N. Kumar, K. Namrata, and A. Samadhiya, "Techno socio-economic analysis and stratified assessment of hybrid renewable energy systems for electrification of rural community," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 55, p. 102950, 2023.
- [73] M. D. A. Al-falahi, S. D. G. Jayasinghe, and H. Enshaei, "A review on recent size optimization methodologies for standalone solar and wind hybrid renewable energy system," *Energy Convers. Manag.*, vol. 143, pp. 252–274, 2017.
- [74] E. L. V Eriksson and E. M. Gray, "Optimization and integration of hybrid renewable energy hydrogen fuel cell energy systems – A critical review," *Appl. Energy*, vol. 202, pp. 348–364, 2017.
- [75] J. Lian, Y. Zhang, C. Ma, Y. Yang, and E. Chaima, "A review on recent sizing methodologies of hybrid renewable energy systems," *Energy Convers. Manag.*, vol. 199, p. 112027, 2019.
- [76] R. Siddaiah and R. P. Saini, "A review on planning, configurations, modeling and optimization techniques of hybrid renewable energy systems for off grid applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 376–396, 2016.
- [77] S. Sinha and S. S. Chandel, "Review of software tools for hybrid renewable energy systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 32, pp. 192–205, 2014.
- [78] Internet, "<https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>."
- [79] Internet, "<https://ihoga.unizar.es/en/>."
- [80] Internet, "<https://www.mathworks.com/products/sl-design-optimization.html>."
- [81] R. Carapellucci and L. Giordano, "Modeling and optimization of an energy generation island based on renewable technologies and hydrogen storage systems," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 3, pp. 2081–2093, 2012.
- [82] Internet, "[https://cran.r-project.org/web/packages/Jaya/vignettes/A\\_guide\\_to\\_JA.html](https://cran.r-project.org/web/packages/Jaya/vignettes/A_guide_to_JA.html)."
- [83] O. Ekren and B. Y. Ekren, "Size optimization of a PV / wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 2, pp. 592–598, 2010.
- [84] F. J. Vivas, A. De Heras, F. Segura, and J. M. Andújar, "A review of energy management strategies for renewable hybrid energy systems with hydrogen backup," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. August 2017, pp. 126–155, 2018.
- [85] E. M. Stewart *et al.*, "Modeling, analysis and control system development for the Italian hydrogen house," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 4, pp. 1638–1646, 2009.
- [86] A. A. Kamel, H. Rezk, and M. Ali, "Enhancing the operation of fuel cell-photovoltaic-battery-supercapacitor renewable system through a hybrid energy management strategy," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, pp. 6061–6075, 2021.
- [87] B. Ould Bilal, V. Sambou, P. A. Ndiaye, C. M. F. Kébé, and M. Ndongo, "Optimal design of a hybrid solar-wind-battery system using the minimization of the annualized
-



- cost system and the minimization of the loss of power supply probability (LPSP),” *Renew. Energy*, vol. 35, no. 10, pp. 2388–2390, 2010.
- [88] J. M. Lujano-Rojas, R. Dufo-López, J. L. Atencio-Guerra, E. M. G. Rodrigues, J. L. Bernal-Aguistin, and J. P. S. Catalão, “Operating conditions of lead-acid batteries in the optimization of hybrid energy systems and microgrids,” *Appl. Energy*, vol. 179, pp. 590–600, 2016.
- [89] C. Bordin, H. O. Anuta, A. Crossland, I. L. Gutierrez, C. J. Dent, and D. Vigo, “A linear programming approach for battery degradation analysis and optimization in offgrid power systems with solar energy integration,” *Renew. Energy*, vol. 101, pp. 417–430, 2017.
- [90] V. Svoboda *et al.*, “Operating conditions of batteries in off-grid renewable energy systems,” *Sol. Energy*, vol. 81, no. 11, pp. 1409–1425, 2007.
- [91] I. Hadjipaschalis, A. Poullikkas, and V. Efthimiou, “Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, pp. 1513–1522, 2009.
- [92] M. Carmo and D. L. Fritz, “A comprehensive review on PEM water electrolysis,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 38, pp. 4901–4934, 2013.
- [93] Lj. Majdandžić, *Solarni sustavi : teorijske osnove, projektiranje, ugradnja i primjeri izvedenih projekata*. Zagreb: Graphis, 2010.
- [94] A. Rabl, *Active Solar Collectors and Their Applications*. Oxford University Press, 1985.
- [95] J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, Second Edi. Wiley, 2009.
- [96] T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe, and E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, Second Edi. Wiley, 2011.
- [97] A. Phinikarides, N. Kindyni, G. Makrides, and G. E. Georghiou, “Review of photovoltaic degradation rate methodologies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 40, pp. 143–152, 2014.
- [98] J. B. Copetti, E. Lorenzo, and F. Chenlo, “A general battery model for PV system simulation,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 1, no. 4, pp. 283–292, 1993.
- [99] J. J. Lander, “Further Studies on the Anodic Corrosion of Lead in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Solutions,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 103, 1956.
- [100] H. Bindner, T. Cronin, P. Lundsager, J. F. Manwell, U. Abdulwahid, and I. Baring-Gould, “Lifetime Modelling of Lead Acid Batteries,” Roskilde, 2005.
- [101] “OPzS Batteries Technical Data.” [Online]. Available: [https://www.tab-polska.pl/fileadmin/user-files/Firma/materialy-dobrania/katalogi/TAB\\_Stationary\\_tech.pdf](https://www.tab-polska.pl/fileadmin/user-files/Firma/materialy-dobrania/katalogi/TAB_Stationary_tech.pdf).
- [102] L. Järvinen *et al.*, “Automized parametrization of PEM and alkaline water electrolyzer polarisation curves,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 47, pp. 31985–32003, 2022.
- [103] C. Chardonnet *et al.*, “Study on Early Business Cases for H<sub>2</sub> in Energy Storage and More Broadly Power to H<sub>2</sub> Applications,” 2017.

- 
- [104] M. Santos and I. M. TecNALIA, “Energy analysis of the Raggovidda integrated system,” 2019.
- [105] F. Barbir, “Regenerative Fuel Cells,” in *J. Garche, C. Dyer, P. Moseley, Z. Ogumi, D. Rand and B. Scrosati (Eds.), Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, vol. 3. Elsevier, pp. 224–237, 2009.
- [106] A. El-kharouf, A. Chandan, M. Hattenberger, and B. G. Pollet, “Proton exchange membrane fuel cell degradation and testing: review,” *J. Energy Inst.*, vol. 85, no. 4, pp. 188–200, 2012.
- [107] O. S. Burheim, *Engineering Energy Storage*, 1st Editio. 2018.
- [108] J. Šimunović, I. Pivac, and F. Barbir, “Techno-economic assessment of hydrogen refueling station: A case study in Croatia,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 57, pp. 24155–24168, 2022.
- [109] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley publishing company, inc., 1989.
- [110] R. L. Haupt and S. E. Haupt, *Practical Genetic Algorithms*, Second Edi. New Jersey: Wiley-Interscience, 2004.
- [111] Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms Data Structures Evolution programs*, Third, Rev. Springer, 1995.
- [112] D. Vučina, *Metode inženjerske numeričke optimizacije*. Split: FESB, 2005.
- [113] A. Chipperfield, P. Fleming, H. Pohlheim, and C. Fonseca, *Genetic Algorithm Toolbox User’s Guide*, Version 1. University of Sheffield.
- [114] A. C. Orrell and E. A. Poehlman, “Benchmarking U.S. Small Wind Costs: With the Distributed Wind Taxonomy,” Richland, Washington, 2017.

---

## Životopis

Jakov Šimunović rođen je 16.05.1989. u Splitu. Nakon završetka osnovnoškolskog obrazovanja upisuje Tehničku školu u Splitu, smjer tehničar za mehatroniku. Po završetku srednjoškolskog obrazovanja, 2008. godine upisuje preddiplomski studij strojarstva na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, sveučilišta u Splitu. Nakon završetka preddiplomskog studija strojarstva, 2012. godine upisuje diplomski studij strojarstva, smjer konstrukcijsko-energetsko strojarstvo. Diplomski studij strojarstva završava u travnju 2015. godine. Poslijediplomski studij strojarstva upisuje u listopadu 2016. godine.

Po završetku diplomskog studija honorarno radi na projektu H2IOE – Istraživanje i razvoj vodikovog energetskog sustava u sprezi s obnovljivim izvorima energije. U ožujku 2016. godine se zapošljava na projektu Autore Horizon 2020, na kojem ostaje zaposlen do isteka ugovora u srpnju 2018. godine. Za vrijeme rada na projektima također se zapošljava honorarno na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje kao nastavno osoblje na kolegijima: Obnovljivi izvori energije i održiv razvoj; Toplinski i hidraulički strojevi; Toplinski strojevi; Brodska postrojenja; Brodski pogonski sustavi; Motori i vozila. U studenom 2018. godine se zapošljava na radnom mjestu asistent na pri Katedri za toplinske strojeve, Zavod za strojarstvo i brodogradnju.

Do danas je kao glavni autor ili koautor objavio ukupno tri znanstvena rada kategorije A u međunarodnim CC časopisima, sedam radova kategorije C u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom.

---

---

## **Curriculum vitae**

Jakov Šimunović was born on May 16, 1989. in Split. After completing his primary education, he entered the Technical School in Split, majoring in mechatronics. After completing his high school education, in 2008, he enrolled in undergraduate studies in mechanical engineering at the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering, and Naval Architecture, University of Split. He received his Bachelor's (B.Sc.) degree in September 2012. and the Master's (M.Sc.) degree in April 2015. He enrolled in the postgraduate study of mechanical engineering in October 2016.

After graduating, he works part-time on the H2IOE project - Research and development of a hydrogen energy system in conjunction with renewable energy sources. In March 2016, he was employed on the Autore Horizon 2020 project, where he will remain employed until the contract expires in July 2018. While working on the projects, he is also employed part-time at the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering, and Naval Architecture as a teaching staff on the courses: Renewable energy sources and sustainable development; Thermal and hydraulic machines; Thermal machines; Ship installations; Marine propulsion systems; Engines and vehicles. In November 2018, he was hired as an assistant at the Department of Heat Engines, Institute of Mechanical Engineering and Shipbuilding.

So far, he has published three articles of category A in international peer-reviewed journals and seven articles of category C in international peer-reviewed conference proceedings.

---