

# Analiza sponne vodnog i elektroenergetskog sustava otoka Unije

---

**Kovačević, Dino**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:985121>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-22**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Dino Kovačević**

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Goran Krajačić, dipl. ing.

Student:

Dino Kovačević

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru izv. prof. dr. sc. Goranu Krajačiću, kao i asistentima Goranu Stunjeku i Marku Mimici na pomoći i dostupnosti koju su mi pružili tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se i projektu INSULAE radi brzog odaziva na ustupljenim podacima, modelima i izvještajima.

Zahvaljujem se Vodoopskrbi i Odvodnji Cres Lošinj na svim podacima koji su mi omogućili kako bih dobio točnije rezultate.

Također se zahvaljujem svojoj obitelji, rodbini i prijateljima na podršci tijekom izrade diplomskog rada.

Dino Kovačević



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Dino Kovačević** Mat. br.: 0035199330

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza spone vodnog i elektroenergetskog sustava otoka Unije**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Water-energy nexus analysis of the Unije Island**

### Opis zadatka:

Nakon potpisivanja Pariškog klimatskog sporazuma te donošenja Europskog zelenog plana, kojim se teži da Europa bude prvi klimatski neutralan kontinent, istraživanja u području održivog razvoja energetske, vodnih i okolišnih sustava sve više u fokus stavljaju proučavanje kompleksne veze vodnih i energetske sustava. Otok Unije najzapadniji je otok u Cresko-lošinjskom arhipelagu i prema zadnjem popisu stanovništva naseljeno je 88 ljudi. Otok je jedan od oglednih otoka (eng. lighthouse islands) u projektu INSULAE koji nastoji razviti nova inovativna rješenja za dekarbonizaciju europskih otoka kako bi se postigli klimatsko-energetski ciljevi. EPANET je model otvorenog koda koji se koristiti za modeliranje vodovodnih sustava i analizu koja obuhvaća optimizaciju rada pumpi i spremnika vode, smanjenje potrošnje električne energije i sl. Koristeći EPANET potrebno je modelirati buduću vodovodnu mrežu otoka Unije te analizirati potrošnju vode i električne energije na razini jedne godine koristeći dostupne podatke. Energetski optimizacijski modeli omogućuju analiziranje scenarija korištenja energetske izvora kako bi se razvile metode za transformaciju budućih energetske sustava uključujući analize energetske sustava s visokim udjelom obnovljivih izvora energije. U sklopu rada potrebno je napraviti pregled literature postojećih optimizacijskim modela koji bi se mogli koristiti u analizi energetske sustava otoka Unije. Odabranim optimizacijskim modelom potrebno je kreirati model energetske sustava otoka koji će u vezi sa EPANET modelom kreirati definiranu sponu između vodnog i energetske sustava otoka Unije.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

1. Modelirati planiranu vodovodnu mrežu otoka Unije koristeći EPANET model.
2. Modelirati elektroenergetski sustav otoka Unije koristeći dostupne optimizacijske modele iz literature
3. Napraviti analizu spone vodnih i elektroenergetskih sustava povezivanjem EPANET i energetske modela
4. Analizirati minimalno 3 scenarija ovisno o različitoj potrošnji i proizvodnji vode i energije na otoku (rezultati analize moraju minimalno sadržavati ukupni trošak za energiju i vodu, integraciju obnovljivih izvora energije, povećanje i smanjenje troškova sustava, smanjenje emisija stakleničkih plinova).

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan: Datum predaje rada: Predvideni datum obrane:  
30. travnja 2020. 2. srpnja 2020. 6. – 10.7.2020.

Zadatak zadao: Predsjednica Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Goran Krajačić

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY .....	X
1. UVOD.....	1
1.1. Pametni otoci.....	1
1.2. Projekt INSULAE .....	2
1.3. Otok Unije.....	4
2. VODOVODNI SUSTAVI.....	8
2.1. Tehnologija desalinizacije.....	8
2.2. Tehnologije uštede vode .....	12
3. POSTOJEĆE I PLANIRANO STANJE NA OTOKU.....	15
3.1. Sustav baterije i fotonaponske elektrane.....	15
3.2. Sustav opskrbe vodom i odvodnja .....	17
3.2.1. Desalinizator .....	18
3.2.2. Sustav odvodnje .....	19
4. METODE I MODELIRANJE .....	21
4.1. EPANET .....	21
4.1.1. Matematičke osnove .....	22
4.1.2. Postavljanje modela .....	23
4.2. Calliope .....	25
4.2.1. Linearno programiranje.....	27
4.3. Modeliranje ulaznih podataka .....	27
4.3.1. Proizvodnja fotonaponske elektrane .....	30
4.3.2. Potražnja za električnom energijom.....	31
4.3.3. Modeliranje potražnje vode .....	32
4.3.4. Troškovi .....	34
4.3.5. Uvozna električna energija.....	36
4.4. Matematički model .....	37
5. REZULTATI .....	39
5.1. Simulacija u EPANET-u.....	40
5.2. Optimizacija u Calliope-u .....	42
5.2.1. Karakterističan zimski tjedan.....	44
5.2.2. Karakterističan ljetni tjedan .....	47
5.2.3. Vodovodni sustav.....	48
5.2.4. Troškovi .....	49
5.3. Alternativni referentni scenarij .....	50
6. SCENARIJI .....	52

---

6.1. Optimizacija baterije (OB).....	53
6.2. Optimizacija desalinizatora (OD) .....	54
6.3. Optimizacija vodospreme (OV) .....	55
6.4. Postojeći spremnici (PS) .....	56
6.5. Kućni spremnici (KS) .....	59
6.6. Ušteda vode (UV) .....	60
6.7. Rekuperacija sive vode (RSV).....	60
6.8. Usporedba scenarija .....	63
7. ZAKLJUČAK.....	66
LITERATURA.....	68
PRILOZI.....	73

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Prikaz komponenti pametnog grada kao analogija pametnom otoku [11].....	2
Slika 2.	INSULAE projekt [12].....	3
Slika 3.	Makrolokacija otoka Unije [15].....	5
Slika 4.	Mali aerodrom na otoku Unije [16].....	6
Slika 5.	Naselje Unije [17].....	6
Slika 6.	Prikaz nestašice vode u svijetu [19].....	8
Slika 7.	Prikaz udjela desalinizacijskih postrojenja u svijetu [21].....	9
Slika 8.	Prikaz postupka destilacije [22].....	9
Slika 9.	Prikaz postupka osmoze i reverzne osmoze [25].....	10
Slika 10.	Pojednostavljena shema desalinizatora s postupkom reverzne osmoze [27].....	11
Slika 11.	Podzemni spremnici za prikupljanje kišnice [32].....	12
Slika 12.	Sustav efikasnog navodnjavanja kapanjem [35].....	13
Slika 13.	Fotonaponska elektrana na krovu desalinizatora [40].....	15
Slika 14.	Prikaz lokacije fotonaponske elektrane [15].....	16
Slika 15.	Shema EES-a iz softvera NEPLAN za područje otoka Unije [42].....	16
Slika 16.	Proces izgradnje vodovodne i kanalizacijske mreže [44].....	17
Slika 17.	Prikaz planirane vodovodne mreže [43].....	19
Slika 18.	Prikaz planiranog sustava odvodnje [43].....	20
Slika 19.	Prikaz cijelog modela u EPANET-u.....	24
Slika 20.	Detaljniji prikaz modela u središtu naselja.....	25
Slika 21.	Shema spajanja lokacija u Calliope-u.....	28
Slika 22.	Dijagram proizvodnje električne energije PV elektrane od 1300 kW na satnoj razini.....	30
Slika 23.	Dijagram proizvodnje električne energije PV elektrane od 1300 kW na mjesečnoj razini.....	31
Slika 24.	Dijagram potražnje za električnom energijom.....	31
Slika 25.	Dijagram potražnje za električnom energijom sumiranom po mjesecima.....	32
Slika 26.	Dijagram broja ljudi na otoku tijekom godine [52].....	33
Slika 27.	Dijagram potrošnje vode nakon tjedne interpolacije.....	33
Slika 28.	Dijagram relativne dnevne potrošnje vode [53].....	34
Slika 29.	Dijagram godišnje potrošnje vode na satnoj razini.....	34
Slika 30.	Dijagram cijene uvozne električne energije na satnoj razini [61].....	36
Slika 31.	Dijagram cijene uvozne električne energije na mjesečnoj razini [61].....	36
Slika 32.	Dijagram potrošnje električne energije desalinizatora.....	39
Slika 33.	Prikaz rada desalinizatora u ovisnosti o cijeni električne energije prema tarifi....	40
Slika 34.	Usporedba razine napunjenosti spremnika u Calliope-u i EPANET-u.....	40
Slika 35.	Prikaz rezultata vodovodne mreže otoka Unije iz EPANET-a.....	41
Slika 36.	Dijagram potrošnje pumpi.....	41
Slika 37.	Dijagram proizvodnje PV elektrane s udjelom punjenja baterije.....	42
Slika 38.	Prikaz odnosa udjela punjenja baterije i uvozne cijene električne energije.....	42
Slika 39.	Usporedba uvozne i referentne cijene otkupa električne energije.....	43
Slika 40.	Dijagram tokova električne energije za tri dana u siječnju.....	44
Slika 41.	Dijagram tokova električne energije za karakteristični zimski tjedan u siječnju..	45
Slika 42.	Detaljniji prikaz dijagrama tokova električne energije za karakteristični zimski tjedan u siječnju.....	46
Slika 43.	Dijagram napunjenosti baterije za karakteristični zimski tjedan u siječnju.....	46
Slika 44.	Dijagram napunjenosti baterije tijekom cijele godine.....	47
Slika 45.	Dijagram tokova električne energije za karakteristični ljetni tjedan u kolovozu..	48



---

Slika 46.	Dijagram nedostatne količine vode ljeti .....	49
Slika 47.	Dijagram tokova električne energije za karakteristični ljetni tjedan u kolovozu pri alternativnom referentnom scenariju .....	50
Slika 48.	Dijagram napunjenosti baterije za karakteristični ljetni tjedan u kolovozu pri alternativnom referentnom scenariju .....	51
Slika 49.	Dijagram potrošnje električne energije desalinizatora u OD scenariju .....	54
Slika 50.	Dijagram usporedbe razine napunjenosti spremnika OD i REF scenarija .....	55
Slika 51.	Dijagram napunjenosti spremnika vode u OS scenariju .....	56
Slika 52.	Shema povezanosti spremnika u Calliope modelu u PS scenariju .....	57
Slika 53.	Dijagram napunjenosti spremnika u PS scenariju .....	58
Slika 54.	Dijagram tokova vode iz spremnika u prva tri dana godine u PS scenariju .....	58
Slika 55.	Dijagram napunjenosti spremnika u KS scenariju .....	59
Slika 56.	Shema povezanosti spremnika u Calliope-u u RSV scenariju .....	61
Slika 57.	Dijagram potražnje za sivom vodom za poljoprivredu u RSV scenariju .....	61
Slika 58.	Dijagram napunjenosti spremnika u RSV scenariju .....	62
Slika 59.	Usporedba LCOE baterije različitih scenarija .....	63
Slika 60.	Usporedba faktora kapaciteta baterije različitih scenarija .....	63
Slika 61.	Usporedba LCOE cijelog sustava različitih scenarija .....	64
Slika 62.	Usporedba faktora kapaciteta uvozne tehnologije različitih scenarija .....	65
Slika 63.	Usporedba faktora kapaciteta desalinizatora različitih scenarija .....	65

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Opis elemenata u EPANET-u.....	24
Tablica 2. Primjeri tehnologija u Calliope-u [48] .....	26
Tablica 3. Odgovarajuće lokacije i tehnologije u Calliope-u .....	27
Tablica 4. Ulazni podaci u model Calliope-a.....	29
Tablica 5. Ograničenja varijabli modela .....	29
Tablica 6. Ulazni podaci u PVGIS [50] .....	30
Tablica 7. Cijene tehnologija.....	35
Tablica 8. LCOE pojedinih tehnologija u referentnom scenariju .....	49
Tablica 9. Faktori kapaciteta pojedinih tehnologija u referentnom scenariju .....	50
Tablica 10. LCOE pojedinih tehnologija u alternativnom referentnom scenariju .....	51
Tablica 11. Faktori kapaciteta pojedinih tehnologija u alternativnom referentnom scenariju .	51
Tablica 12. Opis scenarija .....	52
Tablica 13. Usporedba faktora kapaciteta baterije sličnih scenarija .....	53

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
<b>A</b>	-	Jacobijeva matrica koja sadrži padove tlaka
$C_{desal}$	kW	Tok električne energije u desalinizator
$C_{desal}$	EUR/kWh	Cijena električne energije za desalinizator prema odgovarajućoj tarifi
$C_{izvoz}$	EUR/kWh	Cijena izvoza električne energije
$C_{odr}$	EUR/kWh	Trošak održavanja
$C_{odr,bat}$	EUR/kWh	Trošak održavanja baterije
$C_{odr,des}$	EUR/kWh	Trošak održavanja desalinizatora
$C_{odr,PV}$	EUR/kWh	Trošak održavanja i osiguranja PV tehnologije
$C_{uvoz}$	EUR/kWh	Cijena uvoza električne energije
$D$	m <sup>3</sup> /s	Potražnja vode u hidrauličkom modelu
$D_e$	m	Ekvivalentni promjer cijevi
$D_{el,en}$	kW	Potražnja za električnom energijom
$D_{izvoz}$	kW	Izvoz električne energije
$D_{voda}$	kW	Potražnja za vodom
$E_{bat}$	kWh	Napunjenost baterije
$E_{voda}$	m <sup>3</sup>	Napunjenost spremnika vode
$E_{PV1300}$	kWh	Energija proizvedena iz PV elektrane 1300 kW u godinu dana
$e$	m	hrapavost cijevi
<b>F</b>	-	Vektor (Nx1) koji uključuje korekcijski faktor
$f$	-	Fiksni čvor
$f_D$	-	Darcy-jev faktor trenja
$H$	Pa	Apsolutni tlak (engl. <i>Head</i> )
<b>H</b>	-	Vektor nepoznatih tlakova u čvorovima
$h$	Pa	Pad tlaka u segmentu
$L$	m	Duljina cijevi
$m$	-	Koeficijent lokalnog gubitka
$N$	-	Broj čvorova u hidrauličkom modelu

$n$	-	EkspONENT protoka
$NF$	-	Broj fiksnih čvorova u hidrauličkom modelu
$P_{bat}$	kW	Snaga punjenja i pražnjenja baterije
$P_{PV7}$	kW	Snaga električne energije iz PV elektrane snage 7 kW
$P_{PV300}$	kW	Snaga električne energije iz PV elektrane snage 1300 kW koja služi za punjenje baterije
$P_{PV1300}$	kW	Snaga električne energije iz PV elektrane snage 1300 kW
$P_{teh}$	kW	Tokovi električne energije kroz korištene tehnologije
$P_{uvoz}$	kW	Snaga uvoza električne energije
$Q$	$m^3/s$	Količina protoka
$r$	-	Koeficijent otpora
$v$	m/s	Prosječna brzina fluida u cijevi
$y$	-	Korekcijski faktor
$\rho$	$kg/m^3$	Gustoća fluida
EES		Elektroenergetski sustav
ESS		Sustav za skladištenje električne energije (engl. <i>Electricity storage system</i> )
ICT		Informacijsko komunikacijske tehnologije (engl. <i>Information and communications technology</i> )
IOT		Internet stvari (engl. <i>Internet of things</i> )
KS		Kućni spremnici
LCOE	EUR/MWh	Nivelirani troškovi proizvodnje električne energije (engl. <i>Levelized Cost of Electricity</i> )
OB		Optimizacija baterije
OD		Optimizacija desalinizatora
OV		Optimizacija vodospreme
PS		Postojeći spremnici
UV		Ušteda vode
OIE		Obnovljivi izvori energije
NN		Niski napon (niskonaponska)
NT		Niska tarifa

RC	Referentna cijena
RSV	Rekuperacija sive vode
TS	Trafostanica
VT	Visoka tarifa

---

**SAŽETAK**

Današnji otoci predstavljaju izvrsne lokacije kad su u pitanju inovacije u energetici i korištenje novih tehnologija. Posebnost je u njihovoj izoliranosti od kopna, velikom potencijalu za implementaciju obnovljivih izvora energije (OIE), te potencijalnoj neraspoloživosti osnovnih resursa. Otok Unije je ogledni primjer kao dio INSULAE projekta u okviru kojeg će se implementirati OIE s vodovodnim sustavom, te koristiti nove tehnologije kao što su 5G i IoT (engl. *Internet of Things*) za praćenje i monitoring podataka.

U radu je cilj prikazati analizu spona vodovodnog i elektroenergetskog sustava. Potrebno je istražiti i educirati se o osnovnim elementima tih sustava, uključujući tehnologiju desalinizacije i metode uštede vode. Istraženi su osnovni podatci o otoku Unije te trenutnom i planiranom stanju na otoku, koje obuhvaća sustav baterije i fotonaponske elektrane, te vodovodni sustav s desalinizatorom. Modeliranje ulaznih podataka u sustav preuzeto je iz stvarnih podataka na lokaciji, gdje je to bilo moguće, a djelomično je bilo potrebno uvoditi određene pretpostavke. Za analizu su korištena dva softvera otvorenog koda, EPANET za simulaciju vodovodnog sustava i Calliope za povezivanje i optimizaciju vodovodnog i elektroenergetskog sustava (EES) koristeći linearnu optimizaciju. Softveri su pokazali dobre rezultate i ostavljaju dodatni prostor za daljnji rad i modifikaciju programiranjem. Obrađen je osnovni scenarij koji je opisan, dok ostali scenariji predstavljaju nadogradnju popunjavajući njegove nedostatke.

Ključne riječi: Pametni otoci, INSULAE projekt, vodovodni sustav, desalinizacija, baterija, PV elektrana, optimizacija, spona vodnog i energetskeg sustava.

---

**SUMMARY**

Smart Islands are a good example concerning innovations in Energy Engineering and implementation of modern technologies, due to their isolation from the mainland, huge potential of implementation of Renewable Energy Sources, as well as unavailability of basic resources. The island of Unije is a Lighthouse island as a part of a project INSULAE implementing Renewable Energy Sources with water supply system, as well as using modern technologies such as 5G and IoT for data monitoring.

The aim of this thesis is the analysis of optimal connection between water supply and power system. Exploration and education about basic elements of these systems was needed, including technology of desalination and water saving methods. Basic information about the island and its current and planned state was explored. It consists of system of battery and PV power plant, as well as a water system including desalination plant. Real on-site data was used for modelling of input data, wherever it was possible. On the other hand, certain assumptions were needed for modelling where data could not be provided. Two open source softwares were used for this analysis – EPANET for simulation of water supply system, and Calliope for linking and optimization of water supply and power systems using linear optimization. They showed good results leaving space for future work and modification by programming. Basic scenario was analysed, while other scenarios represent its upgrade filling its disadvantages.

Key words: Smart islands, INSULAE project, water supply system, desalination plant, battery, PV power plant, optimisation, water supply and power system connection

## 1. UVOD

Otoci u modernom svijetu se moraju dodatno zalagati za borbu protiv klimatskih promjena pošto su upravo oni među prvima koji će osjetiti razarajuće posljedice na svojoj obali, ako dođe do značajnijeg podizanja razine mora. Otoci su dobrim dijelom izolirani od kopna, što podrazumijeva veliku ovisnost o fosilnim gorivima kao energentima, visoke cijene transporta dobara, probleme s dobavom vode, ograničenu diversifikaciju ekonomske ponude i veću mogućnost monopola pojedinih igrača na tržištu [1]. Poticanjem i implementacijom OIE, otoci mogu riješiti većinu navedenih problema. Uvođenjem vlastite, obnovljive proizvodnje električne energije, otoci prestaju biti ovisni o fosilnim gorivima. Izgradnjom desalinizacijskog postrojenja koje bi koristilo OIE, smanjili bi se značajno troškovi vode koja je na otocima izrazito skupa i količinski siromašna, te bi se smanjila ovisnost o dobavljaču pitke vode. Promoviranje otoka kao zelenog ili samoodrživog privlači brojne turiste iz pretežito razvijenijih zemalja gdje je izraženija svijest o problemima vezanima za klimatske promjene.

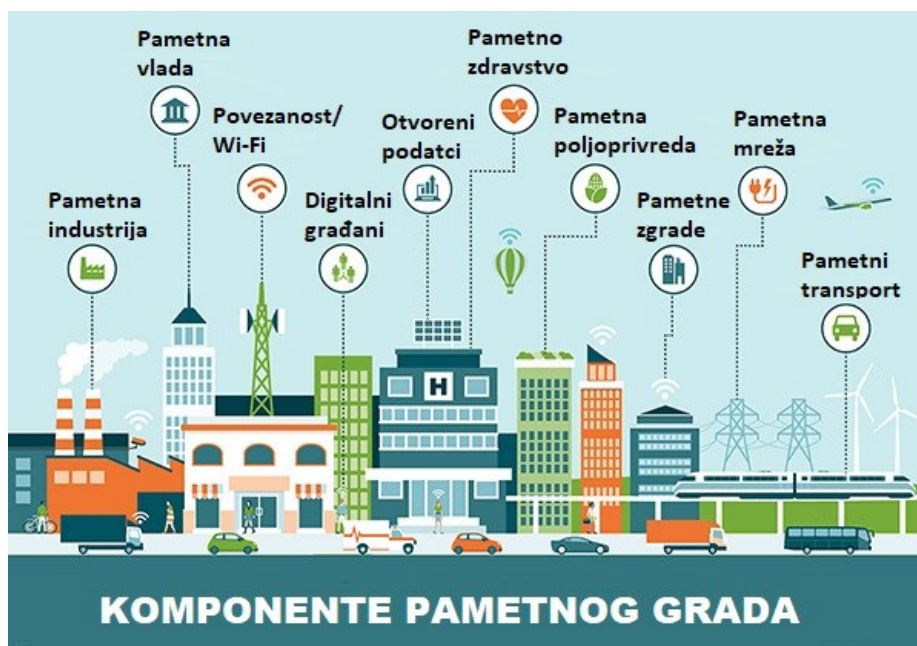
U literaturi postoje brojni primjeri obrađenih tema vezanih za pametne otoke, konkretno za otoke na Kvarneru s fokusom na planiranje energetske sustava i transporta [2], [3]. Konkretno za Unije obrađena je analiza energetske održivosti i očuvanja života na otoku, kao i analiza integracije solarnih fotonaponskih panela [4], [5]. Postoje radovi koji analiziraju korištenje OIE za desalinizaciju, kao i oni koji analiziraju potrošnju električne energije u sustavu vodoopskrbe [6], [7], [8]. Međutim, nisu pronađeni radovi u kojima se analizira spona elektroenergetskog i vodovodnog sustava koji uključuje desalinizaciju na pametnom otoku.

### 1.1. Pametni otoci

Današnja energetika se počela baviti konceptima pametnih otoka (engl. *smart islands*), koji se baziraju na elektrifikaciji transporta, proizvodnji energije iz OIE, cirkularnoj ekonomiji i održivom razvoju. Europska inicijativa pametnih otoka je izgrađena na dugogodišnjoj suradnji europskih otoka koji žele iskoristiti svoj značajni potencijal da postanu laboratoriji za tehnološke, socijalne i okolišne inovacije. Uspješni primjeri već postoje u Danskoj, a Hrvatska se može pohvaliti s Krkom, koji se već smatra pametnim otokom, a uskoro planiraju postati prvim energetske neovisnim i CO<sub>2</sub> neutralnim otokom na Mediteranu [9], [10]. Unatoč očitim nedostacima, korištenjem novih pametnih tehnologija u suradnji s financijskom i regulatornom potporom, otoci mogu premostiti svoje nedostatke i iskoristiti potencijal obnovljivog razvoja.



Infrastruktura za upravljanje resursima postoji, ali pati tijekom sezonskih promjena demografije na otoku kada je znatno intenzivnija potražnja za uslugama. Kao odgovor na to, inicijativa poziva na integrirani pristup upravljanja prirodnim resursima i infrastrukturom. Inspirirajući se konceptom pametnog grada, inicijativa ide korak dalje proširujući sinergiju transporta, energije i informacijsko komunikacijskih tehnologija (engl. *Information and communications technology* - ICT) integrirajući vodu, kao i otpad čime se osigurava cirkularnost u ekonomiji, Slika 1. [1].



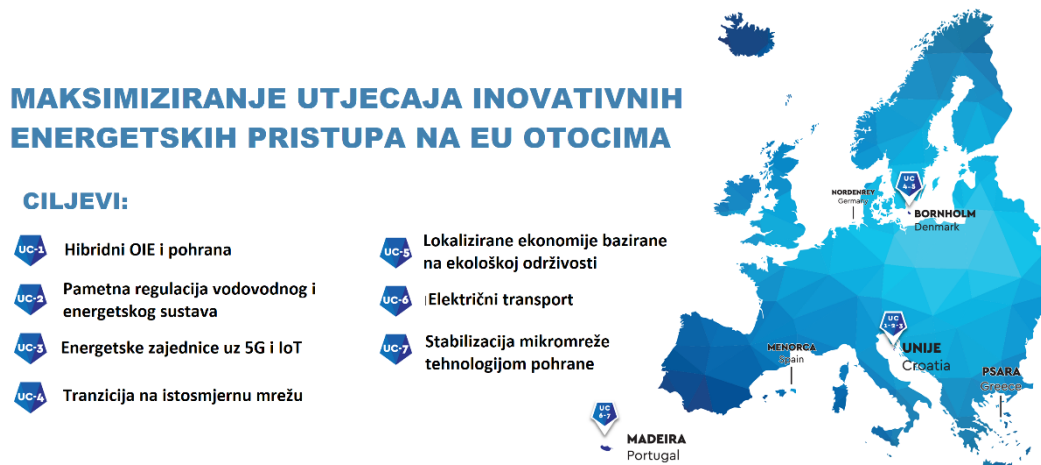
Slika 1. Prikaz komponenti pametnog grada kao analogija pametnom otoku [11]

Novi pristup osigurava da se korištenjem pametnih i integriranih rješenja uz implementaciju modernih tehnologija, otoci mogu pretvoriti u pametna područja nudeći visoku kvalitetu života lokalnoj zajednici. Posebnost primjene koncepta pametnog otoka je mogućnost replikacije stečenih znanja na druge otoke. Zato postoje pilot projekti kao što su Unije na kojima se planira definirati poslovne modele koji će se primijeniti na drugim europskim otocima, kao i u nekim izoliranim ruralnim dijelovima ili gradovima [1].

## 1.2. Projekt INSULAE

Puno ime ovog projekta glasi: „Maksimiziranje utjecaja inovativnih energetske pristupa na otocima EU (engl. *Maximizing the impact of innovative energy approaches in the EU islands*)“. Radi se o projektu financiranom od strane EU u okviru programa Obzor 2020 (engl. *Horizon 2020*), a uključuje 27 partnera i ukupni proračun veći od 12 milijuna eura. Fokusiran je na dekarbonizaciju otoka koja je ključna, kako za postizanje klimatsko-energetskih ciljeva, tako i

za bolju kvalitetu života na otocima. Projektne aktivnosti bit će usmjerene na otoke Unije (Hrvatska), Bornholm (Danska) i Madeira (Portugal), a rezultati tamo provedenih pilot aktivnosti bit će korišteni za transfer znanja i izradu akcijskih planova otoka Menorca (Španjolska), Norderney (Njemačka), Psara (Grčka) i Bonaire (Nizozemski Antili) [12].



Slika 2. INSULAE projekt [12]

Hrvatski partneri na projektu, uz REA Kvarner, su Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Ericsson Nikola Tesla, Vodoopskrba i odvodnja Cres-Lošinj (ViOCL), kao i WWF Adria [13]. Ericsson NT je zadužen za implementaciju 5G tehnologije i komunikacijske infrastrukture. Njihov zadatak, između ostalog, uključuje provjeru IoT (engl. *Internet of things*) sučelja za pametnu i održivu poljoprivredu koristeći vodu iz desalinizacijskog postrojenja. Ericsson također omogućuje detaljno prikupljanje podataka vezanih za proizvodnju energije iz fotonaponske elektrane, stanje napunjenosti baterije, procjenu potrošnje energije na otoku, prognoze vremena i druge čimbenike koji omogućavaju optimalnu potrošnju energije za sustav navodnjavanja. WWF Adria je zadužen za procjenu i osiguravanje utjecaja na okoliš, dok ViOCL i REA Kvarner služe kao lokalna potpora na projektu. ViOCL je zadužen za ugradnju opreme i izgradnju vodovodnog sustava koji će biti ukomponiran s IoT platformom koju izrađuje Ericsson NT. REA Kvarner služi kao provedbeno tijelo i potpora na strani dobivanja dozvola i komunikacije između partnera [12].

Ideja je dokazati da se izgradnjom buduće fotonaponske elektrane snage 1 MW i baterijskog postrojenja kapaciteta 1600 kWh za skladištenje proizvedene električne energije može postići energetska neovisnost otoka tijekom cijele godine uključujući IoT i eventualno strojno učenje (engl. *Machine learning*). Također je osigurana proizvodnja tehnološke vode iz desalinizacijskog postrojenja koje je pušteno u pogon 2017. godine. Postoji plan razrade

vodovodne mreže i spremnika vode koji bi se primarno punio iz desalinizacijskog postrojenja, uz dodatni izvor vode iz vodonosca, ako to bude potrebno [14].

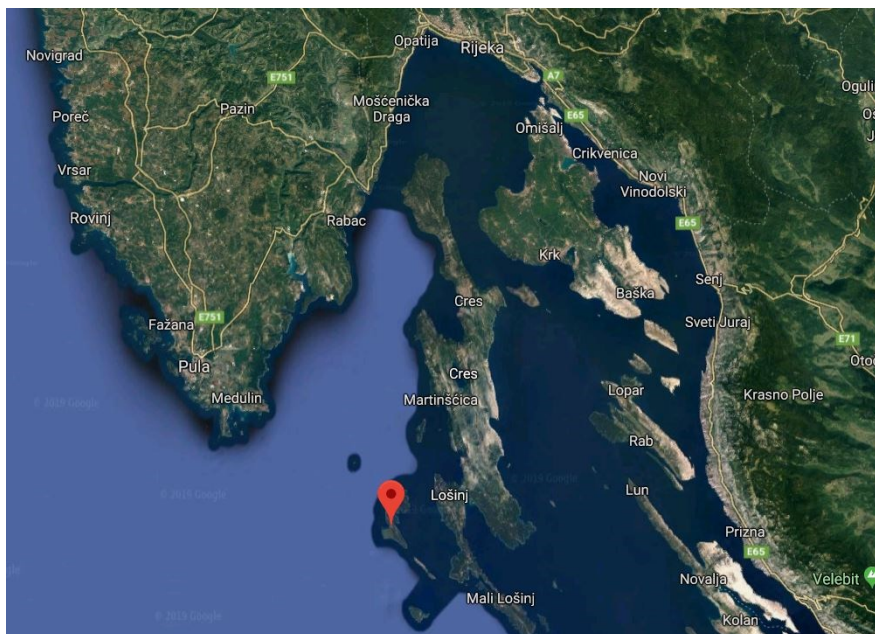
Specifični ciljevi projekta su:

- Razviti alat za planiranje investicija koji može pomoći donositeljima odluka na europskim otocima u izradi ekonomičnih akcijskih planova za dekarbonizaciju energetske sustava.
- Dovedi demonstracijski projekt na tri ogledna otoka do razine tehnološke spremnosti TRL 8, kroz sedam konkretnih intervencija kojima će se rješavati glavni izazovi u otočnim energetske sustavima. Konkretno, na Unijama će se na buduću HEP-ovu sunčanu elektranu (1 MW) nadograditi baterijsko postrojenje za pohranu proizvedene energije. Upravljanje i balansiranje cijelim sustavom je najvažniji dio u hrvatskom dijelu konzorcija.
- Osigurati kroz članove INSULAE konzorcija visoki stupanj replikacije projektnih rezultata kako bi s istima bilo upoznato čak 13% ukupne EU otočne populacije.
- Uključiti građanstvo na otocima u energetske tranzicije uvažavajući ih kao aktivne dionike energetske sustava.
- Zaštititi ekosustave otoka kroz očuvanje njihove bioraznolikosti, ali i kulturne baštine, a sve s ciljem jačanja turizma.
- Okupiti kritičnu masu profesionalaca koji su spremni replicirati rezultate projekta INSULAE oslanjajući se na edukacijske aktivnosti i međutočnu razmjenu iskustava.
- Razmijeniti znanja s radnim skupinama BRIDGE inicijative, doprinoseći Inicijativi europskih otoka i homogenizaciji trenutno fragmentiranih regulativa vezanih uz otoke [14].

### 1.3. Otok Unije

Otok Unije se nalazi na Kvarneru, u sjevernom dijelu Jadranskog mora, zapadno od Lošinja. Prema administrativno-teritorijalnom ustroju pripada gradu Malom Lošinja, odnosno Primorsko-goranskoj županiji. Sa svoje zapadne strane izložen je otvorenom moru, a s južne strane mu se nalaze Male i Vele Srakane, te Susak, Slika 3. Ukupna površina iznosi 16,77 km<sup>2</sup>, sa 36,6 km dugom razvedenom obalom. Unatoč dobrom geoprometnom položaju, izvorima vode i prostranom plodnom tlu, Unije su danas slabo naseljene s negativnim trendom rasta. Prema popisu stanovništva iz 2011. godine, na otoku boravi svega 88 stanovnika, dok taj broj danas iznosi nešto manje, a kroz povijest se kretao do 1000 stanovnika. Prema spomenutom

popisu, u jedinom naseljenom mjestu na otoku nalazi se 47 kućanstava, dok se na cijelom otoku ukupno nalaze 292 stambene jedinice u privatnom vlasništvu [4].



**Slika 3. Makrolokacija otoka Unije [15]**

Na otoku boravi pretežito starije stanovništvo koje se bavi poljoprivredom, maslinarstvom i ribarstvom. Međutim, otok značajno ovisi o turizmu u ljetnim mjesecima kada broj ljudi na njemu znatno naraste (prema procjenama između 800-900), a mijenjaju se i afiniteti i potrebe ljudi koji borave. Povezanost otoka s kopnom i ostalim otocima je zadovoljavajuća, jer otok jednom dnevno obilazi katamaran iz Rijeke, te postoji lokalna brodska veza iz Malog Lošinja preko susjednih otoka. Nadalje, postoji i mali aerodrom kojim mogu prometovati manji zrakoplovi, međutim trenutno nije u upotrebi zbog administrativnih i političkih razloga što znatno šteti turističkoj ponudi otoka, Slika 4.



**Slika 4. Mali aerodrom na otoku Unije [16]**

Otok je prilično zarastao te je neprohodan zbog velikog broja makija koje se ne održavaju. Na otoku se nalazi samo jedno mjesto, te ne postoje prometnice, osim običnih bijelih puteva (makadama) i ponekih betoniranih puteva, primjerice put prema uvali Maračol, Slika 5. Uvala Maračol služi kao sidrište za nautički turizam koje pokriva 50 brodova. Na otoku se ne koriste automobili nego isključivo bicikli i mala dostavna vozila kojima mještani prebacuju robu s broda i koriste ih za obradu polja.



**Slika 5. Naselje Unije [17]**

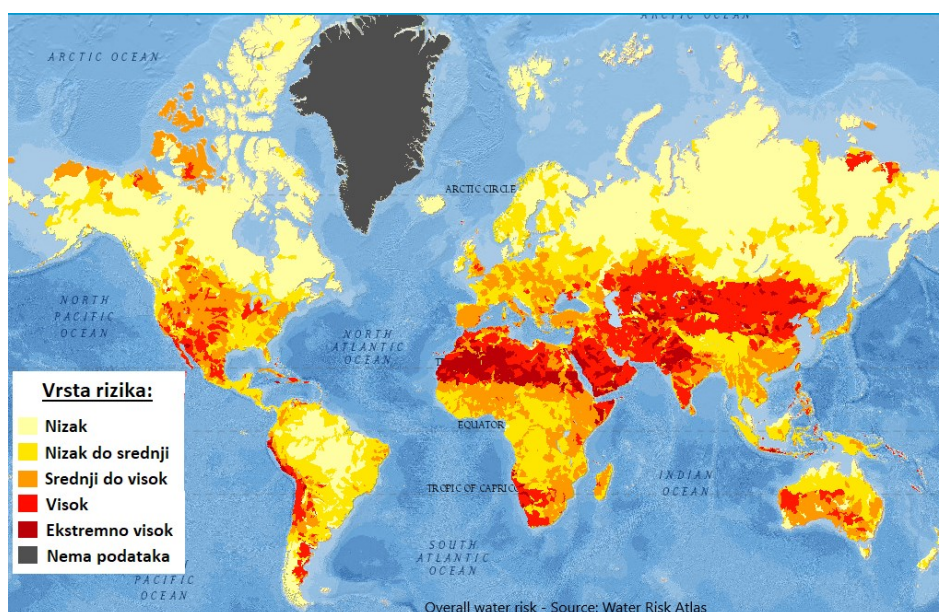
Za poticanje razvoja otoka i ostvarivanje energetske neovisnosti potrebno je provesti demografske promjene, odnosno motivirati mlado stanovništvo da ostane živjeti na otoku te privući mlade iz drugih dijelova regije da dođu živjeti na otok na kojem bi se otvorila nova

---

radna mjesta. Obnovljivi izvori energije danas, ne samo da otvaraju nova radna mjesta, već su izuzetno privlačni u turističkom smislu jer otok može postati samoodrživ i zaraditi na tom brendu. Otok ima ogroman prirodni potencijal s velikim brojem sunčanih sati, izvorom vode, kao i velikim raspuštenim, ali plodnim poljima [16].

## 2. VODOVODNI SUSTAVI

Unatoč tome što je naš planet prekriven sa 70% vode, oko 1 milijardu ljudi imaju nestašicu vode, a 2,7 milijardi imaju nestašicu bar jedan mjesec u godini. Također, 2,4 milijarde ljudi imaju probleme s odvodnjom vode što dovodi do raznih bolesti kao što su kolera i tifus. Preveliko je opterećenje na izvore vode koje čovječanstvo trenutno crpi, prvenstveno u svrhe poljoprivrede, Slika 6. Klimatske promjene dodatno otežavaju situaciju jer prouzrokuju neravnotežu u količini padalina u svijetu, tako se povećava broj poplava u jednom, a broj suša u drugom području na svijetu [18]. Jedno od rješenja za ovaj problem je tehnologija desalinizacije koja može bočatu ili slanu vodu pretvoriti u pitku koristeći električnu ili toplinsku energiju.

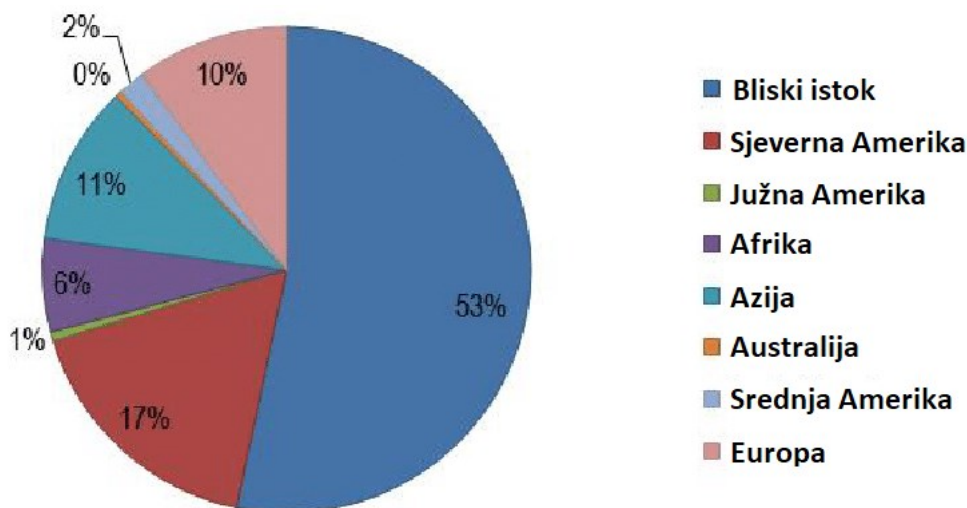


Slika 6. Prikaz nestašice vode u svijetu [19]

### 2.1. Tehnologija desalinizacije

Desalinizacija je proces odvajanja mineralne komponente iz slane ili bočate vode. Koristi se kako bi se obrađena voda mogla primijeniti kao pitka voda ili siva voda u svrhu navodnjavanja. Nusprodukt desalinizacije je koncentrat s visokim sadržajem klorida koji se mora zbrinuti. Koristi se na raznim brodovima i podmornicama kao izvor pitke vode. Zajedno s pročišćenom otpadnom vodom, desalinizirana voda je jedan od rijetkih izvora neovisnih o padalinama i hidrologiji. Zbog visoke potrošnje energije, desalinizirana voda je generalno skuplja od pitke vode iz rijeka, podzemnih voda i pročišćene otpadne vode. Međutim, ti konvencionalni izvori nisu uvijek dostupni, te imaju ograničenu izdašnost što predstavlja rastući globalni problem.

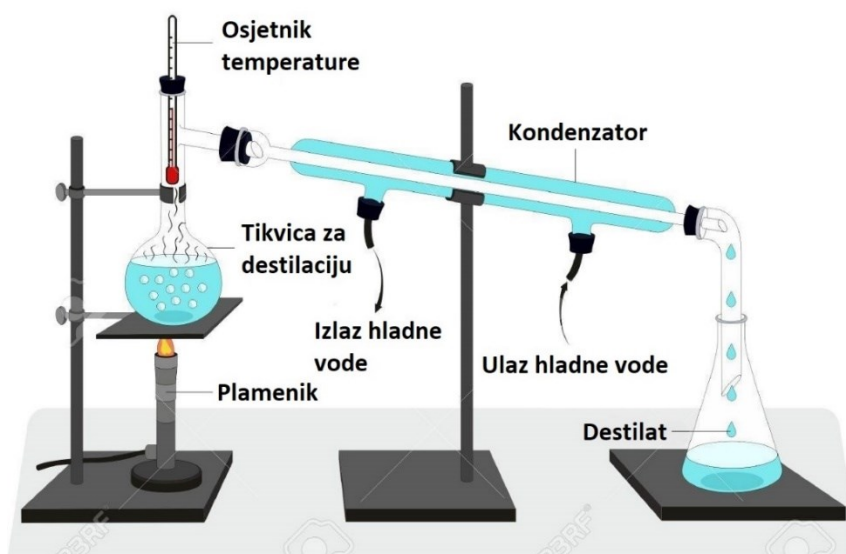
Trenutno, oko 1% Zemljine populacije je ovisno o desaliniziranoj vodi za ispunjavanje potreba za vodom, ali UN procjenjuje da će 14% svjetske populacije osjetiti nedostatak vode do 2025. godine. Desalinizacija je posebno važna u zemljama sa suhom klimom kao što je Australija ili zemlje Bliskog istoka, Slika 7. Kuvajt primjerice svu vodu koju koristi proizvodi iz procesa desalinizacije [20].



Slika 7. Prikaz udjela desalinizacijskih postrojenja u svijetu [21]

Desalinizacijski procesi se najčešće dijele na termalne (destilacija) i električne (reverzna osmoza).

Destilacija je proces fizikalnog odvajanja minerala od kapljevite smjese koristeći proces isparavanja i kondenzacije. Isparavanjem se kapljevita faza pretvara u parovitu, te kasnije kondenzira da bi se vratila u kapljevitu kao pročišćena, pitka voda. Minerali i čestice ostaju taloženi pri dnu posude, Slika 8.



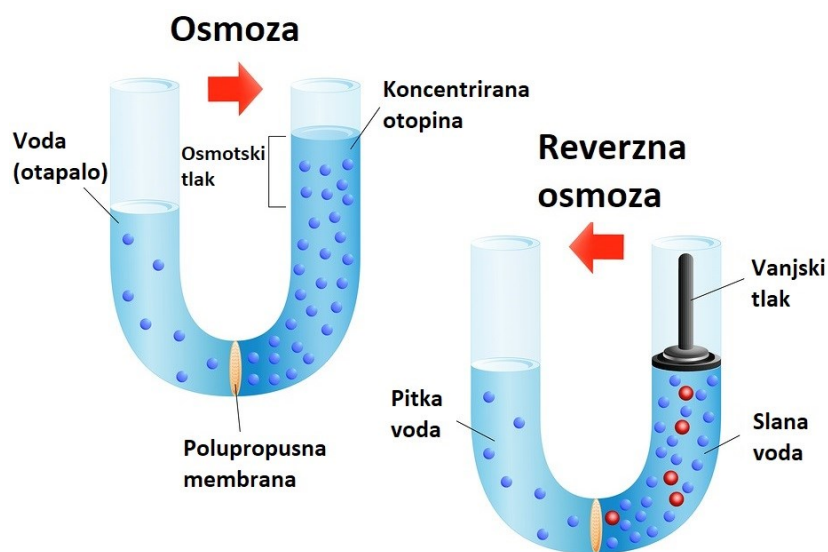
Slika 8. Prikaz postupka destilacije [22]



Osim klasičnog, postoje razne vrste procesa destilacije čiji je princip baziran na isparavanju ili ishlapljivanju kapljevine koja ponovno kondenzira u kapljevitu fazu. Primjerice solarna destilacije može koristiti fotonaponske panele kao izvor električne energije kojom se isparava voda ili može direktno grijati vodu pomoću solarnih kolektora. Vakuumska destilacija postizanjem vakuuma i smanjenjem temperature isparavanja omogućuje korištenje niskotemperaturne otpadne topline iz elektrana ili industrijskih energana za isparavanje. Na taj način je moguće spojiti procese proizvodnje topline ili električne energije s procesom proizvodnje, odnosno pročišćivanja vode [23].

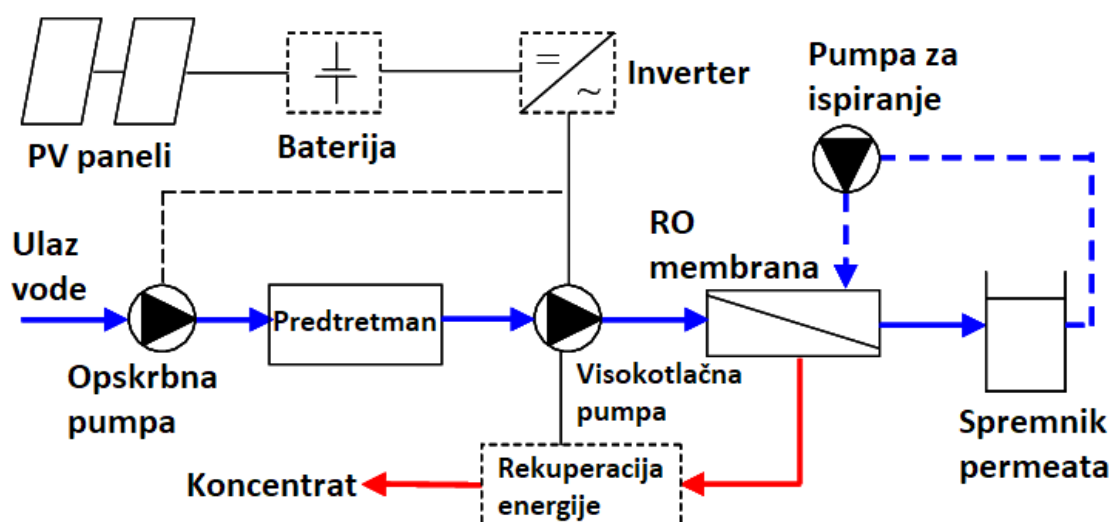
Reverzna osmoza je membranski proces koji je danas najzastupljeniji u svijetu kada su desalinizacijska postrojenja u pitanju. Potrebno je opisati proces osmoze i reverzne osmoze kako bi se jasnije mogao razumjeti proces većine desalinizacijskih postrojenja, Slika 9. U procesu osmoze potrebna je otopina, otapalo i polupropusna membrana koja propušta otapalo, ali zaustavlja otoplenu tvar. Na slici lijevo, voda (s lijeve strane polupropusne membrane) predstavlja otapalo s niskom koncentracijom otopljene tvari, dok otopina (s desne strane polupropusne membrane) ima veću koncentraciju otopljene tvari. Zbog niske koncentracije otopljene tvari s lijeve strane, voda će prelaziti na desnu stranu kroz polupropusnu membranu dok ne dođe do izjednačavanja koncentracije. Primjetno je da će postojati razlika u visini desnog i lijevog stupca, a to predstavlja osmotski tlak [24].

Reverzna osmoza (desni dio slike) je obrnuti proces gdje se vanjskim utjecajem tlači otopina s desne strane U-cijevi kako bi voda strujala na lijevu stranu povećavajući volumen pitke vode, a smanjujući volumen otopine. Na taj način postoji još veća razlika između koncentracija, ali za to je potreban vanjski izvor tlaka koji održava sustav u novonastaloj ravnoteži.



Slika 9. Prikaz postupka osmoze i reverzne osmoze [25]

Procesi reverzne osmoze uglavnom troše manje energije od destilacijskih procesa, a taj trošak znatno ovisi o salinitetu vode, veličini postrojenja i vrsti procesa. Trenutno je proces skuplji od konvencionalnog načina prikupljanja vode iz izvora, ali očekuje se smanjenje troškova s napretkom tehnologije koji uključuje povećanje iskoristivosti, efikasniju pripremu vode, optimizaciju postrojenja i smanjenu cijenu izvora energije [26].



Slika 10. Pojednostavljena shema desalinizatora s postupkom reverzne osmoze [27]

Potrošnja energije desalinizacijskog procesa reverzne osmoze iznosi 3-5,5 kWh/m<sup>3</sup>, uključujući prefiltriranje, te je konkurentna tradicionalnoj opskrbi vode na velike udaljenosti, primjerice kao na Unijama. S druge strane, potrošnja energije u odnosu na tradicionalnu lokalnu opskrbu vode od 0,2 kWh/m<sup>3</sup> je i dalje jako visoka [28].

Desalinizacijska postrojenja imaju određeni utjecaj na okoliš, stoga je potrebno obratiti pozornost na kojim mjestima i kojim protokom će se dovoditi voda kako ne bi došlo do uništavanja ekoloških staništa raznih biljnih i životinjskih vrsta. Ispust koncentrata, koji je uglavnom više temperature od okoliša, mora biti reguliran jer najčešće u sebi sadrži ostatke predtretmana, kemikalije i metale koji nastaju korozijom. Međutim, postoje metode kojima desalinizacijska postrojenja tretiraju koncentrat da ne dođe do značajnog ekološkog utjecaja. Koncentrat se može miješati i s rashladnom vodom termoelektrane gdje se koncentracija mješavine višestruko smanjuje [29]. Unatoč nedostacima, generalni konsenzus javnosti je zadovoljavajući i ide u korist tehnologiji desalinizacije [30]. Zanimljive su hibridne konfiguracije gdje se permeat visoke koncentracije iz postupka reverzne osmoze miješa s

destilatom iz postupka destilacije, a izvor energije oba procesa je otpadna topline iz energetskog procesa [31].

## 2.2. Tehnologije uštede vode

S obzirom na rastući problem opskrbe vode danas i prognozama o nedostacima vode u budućnosti, potrebno je osvijestiti pojedinca o tematici te mu ponuditi rješenja kako uštedjeti vodu. Time pojedinac pomaže globalnoj krizi opskrbe vodom, ali i smanjuje vlastite komunalne troškove.

Danas postoje razne tehnologije uštede vode, među kojima su se neke koristile od davnina, a neke su relativno nove. Od davnih dana ljudi su koristili kišnicu i spremnike vode kako bi se opskrbili pitkom vodom, međutim danas ta voda većinom ne ispunjava sve zahtjeve prema standardima o pitkoj vodi. Postoje kućni kanalizacijski sustavi kojima se kišnica prikuplja u podzemnom spremniku da bi se koristila za navodnjavanje u manjim poljoprivrednim poljima ili za navodnjavanje travnjaka u sušnom periodu, Slika 11 [32].



Slika 11. Podzemni spremnici za prikupljanje kišnice [32]

Ovo su naravno investicijski skupi pothvati, pogotovo za otoke kao što su Unije, međutim za istu svrhu se mogu iskoristiti kućni spremnici za prikupljanje kišnice, kakvi se nalaze na većini otoka, koji bi služili za polijevanje kućnih vrtova ili travnjaka. Na taj način pridonijelo bi se znatno kućnoj uštedi izbjegavajući korištenje čiste i pitke vode za navodnjavanje, a biljkama bi dodatno koristila voda koja ne sadrži klor. Osim vrtova, kišnica se može koristiti za vodokotlić, pranje auta ili kućnih ljubimaca i sl. [33].

Moderni sustavi navodnjavanja koriste cijevi položene na zemlju koje ravnomjerno navodnjavaju područje kroz svoje pore, tzv. navodnjavanje kapanjem, Slika 12. Koristeći taj sustav, dodatno se smanjuje gubitak koji nastaje zbog isparavanja vode kao u konvencionalnim crijevima za navodnjavanje. Također, korištenjem pametnih sustava sa sensorima, omogućava se navodnjavanje točno one količine vode koja je potrebna čime se ostvaraju značajne uštede do 40% [34].



**Slika 12. Sustav efikasnog navodnjavanja kapanjem [35]**

Jednostavnim kućnim separatorima je moguće reciklirati određeni dio sive vode koja dolazi iz sudopera, perilice rublja ili tuš kabine. Ista ta voda se može koristiti za navodnjavanje ili vodokotlić.

Vodokotlići su najveći potrošači vode u kućanstvima s udjelom oko 30% [36]. Ugrađivanjem vodokotlića s dvije postavke ispiranja mogu se ostvariti značajne uštede jer troše do 67% manje vode od konvencionalnih vodokotlića [37].

Najjednostavnije, a jako efikasne mjere uštede podrazumijevaju ugrađivanje niskoprotočnih nastavaka za slavine za umivaonike i sudopere, tzv. perlatora. Perlatori u kombinaciji sa slavinom prozračuju tok vode miješajući vodu sa zrakom i mogu uštedjeti vodu do 30%, te su isplativi s obzirom na nisku cijenu [36]. Ista stvar se može primijeniti na mlaznicu tuša koja u standardnoj izvedbi troši oko 9,5 L/min. Efikasnije mlaznice tuša mogu smanjiti protok na 7,5 L/min te ostvariti uštedu od 20% [36].

Osim svih navedenih uređaja i zahvata za smanjivanje potrošnje vode u kućanstvu, najveći doprinos u smanjenju potrošnje može donijeti čovjek mijenjajući svoje navike kako raspolaže s dostupnom vodom. Smanjenjem vremena tuširanja, racionalnim korištenjem slavine i ostalih uređaja koji troše vodu može se znatno uštedjeti i smanjiti troškove.

Sustavima daljinskog očitavanja, koji se danas primjenjuju kod većih potrošača moguće je automatski pratiti potrošnju vode u realnom vremenu gdje sustav otkriva puknuća u cijevima te pravovremeno intervenira. Pokvareni vodokotlići ili slavine koje cure također mogu prouzrokovati znatne mjesečne gubitke [38].

### 3. POSTOJEĆE I PLANIRANO STANJE NA OTOKU

Postojeće stanje na otoku Unije obuhvaća desalinizator, PV elektranu na krovu desalinizatora i dio sustava opskrbe vodom koji je u izgradnji. Sustav baterije i fotonaponske elektrane još je u fazi planiranja, dok je ostatak sustava opskrbe vodom u fazi izgradnje. Opisano je postojeće i planirano stanje vodovodnog sustava te planirano postrojenje fotonaponske elektrane i baterije.

#### 3.1. Sustav baterije i fotonaponske elektrane

Postojeće stanje sustava električne energije uključuje potrošače i trafostanicu TS Unije 10/0,4 kV koja je spojena s elektroenergetskom mrežom. Na krovu postojećeg desalinizatora instalirana je fotonaponska elektrana snage 7 kW koja je spojena na niskonaponsku (NN) distribucijsku mrežu 0,4 kV te će također biti analizirana u modelu, Slika 13 [39].



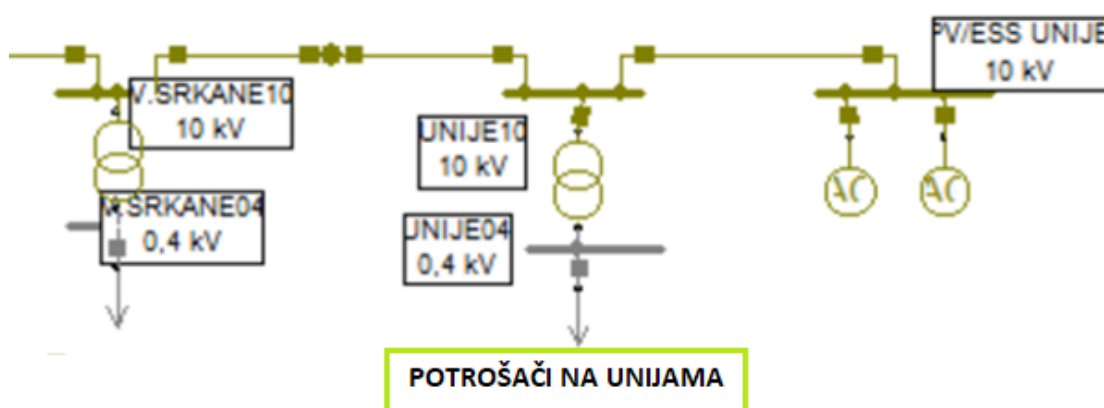
**Slika 13. Fotonaponska elektrana na krovu desalinizatora [40]**

U planu je izgradnja fotonaponske elektrane snage 1 MW u vlasništvu HEP-a, te baterija kapaciteta 1,6 MWh financirana iz projekta INSULAE [12]. Fotonaponska elektrana će se nalaziti jugoistočno od naselja Unije, Slika 14. Istraživanjem se pokazalo da je lokacija izuzetno povoljna s ukupnim godišnjim sunčevim zračenjem na vodoravnu plohu oko 1,47 MWh/m<sup>2</sup> [41].



Slika 14. Prikaz lokacije fotonaponske elektrane [15]

Lokacija baterije se predviđa neposredno uz lokaciju fotonaponske elektrane, na istoj parceli. Baterija (ESS – engl. *Electricity storage system*) će biti snage 400 kW, uz pohranu energije od 1600 kWh. Ukupna snaga fotonaponske elektrane iznosi 1300 kW pri nominalnom izmjeničnom naponu, od čega je 1000 kW zakupljeno za prodaju u elektroenergetski sustav, dok će 300 kW služiti za punjenje baterije [39]. Otok Unije, zajedno s otocima Suskom, te Malim i Velim Srakanama napajan je iz trafostanice TS 110/35/10 kV Lošinj transformacijom preko TS 35/10 kV Lošinj snage 2,5 MVA. Opskrba krajnjih kupaca na otoku Unije se vrši preko TS 10/0,4 kV smještene na Unijama, koja je 10 kV vodom povezana s Velim Srakanama. Fotonaponska elektrana i ESS će biti zajednički priključene na transformator nazivne snage 1,6 MVA koji će biti spojen na postojeću TS na Unijama, Slika 15 .



Slika 15. Shema EES-a iz softvera NEPLAN za područje otoka Unije [42]

### 3.2. Sustav opskrbe vodom i odvodnja

Postojeće stanje vodoopskrbe na otoku Unije obuhvaća bunar s bočatom vodom, desalinizator, razvodnu mrežu po naselju koja je trenutno u izgradnji, vlastite izvore prikupljanja vode (kišnice), javni spremnik kod crkve, te dopremu vode vodonoscem [43].

Vlastiti izvori se sastoje od cisterni u sklopu pojedinog stambenog objekta u kojima se prikuplja kišnica i voda iz hidranata raspoređenih po naselju. Mještani tako prikupljaju vodu i koriste ju u svojim kućanstvima. Voda se iz kućnih cisterni crpi kućnim hidroforom i distribuira u razvodnu instalaciju. Javne cisterne su velikog volumena te se nalaze kod škole ( $350\text{ m}^3$ ), crkve ( $350\text{ m}^3$ ) i mjesnog odbora ( $850\text{ m}^3$ ). Sve do izgradnje desalinizatora, cisterna kod crkve je bila glavna i nadopunjavala se vodom iz vodonosca, dok su se ostale cisterne nadopunjavale kišnicom [39]. Danas se koristi samo cisterna kod crkve koja se puni vodom iz desalinizatora i dalje distribuira po naselju, dok su ostale cisterne van upotrebe do daljnjega. Nakon izgradnje planirane vodospreme ( $800\text{ m}^3$ ), planira se cisternu kod crkve maknuti iz uporabe. Izgradnja vodovodne i kanalizacijske mreže je u tijeku, Slika 16 [43].



Slika 16. Proces izgradnje vodovodne i kanalizacijske mreže [44]

Bočata voda se crpi iz postojećeg bunara U-1 u polju s novim usisnim crpkama kapaciteta  $2\text{ l/s}$ . Prethodne pumpe su bile pogonjene dizel agregatom, a novopostavljene su povezane na niskonaponski distribucijski sustav. Voda se iz bunara tlači u tlačni cjevovod koji ide sve do desalinizatora, dužine  $531\text{ m}$  i promjera  $125\text{ mm}$ . Ispitivanjima je pokazana minimalna izdašnost bunara od cca  $3,5\text{ l/s}$ , odnosno  $250\text{--}300\text{ m}^3$  dnevno. Ta ispitivanja su provedena još u 20. stoljeću, stoga je potrebno provesti nova ispitivanja kako bi se ustvrdilo koliko je izvedivo nadograđivati tu količinu crpljene vode na duži vremenski period. Nakon desalinizatora, voda se iz bazena pročišćene vode  $40\text{ m}^3$  u sklopu desalinizatora tlači sve do spremnika kraj crkve.



Trenutna razvodna mreža ne povezuje hidrofor sa stambenim objektima, već s 10 hidranata koji su rasprostranjeni po naselju. Po potrebi se površinskim razvodom povezuju hidranti i kućne cisterne. Prije početka radova, naselje se ljeti opskrbljivalo vodom iz vodonosca, tankera volumena 250-1000 m<sup>3</sup>, ovisno o potrebi. Vodonosac se, osim na Unijama, koristi i na ostalim otocima Lošinjskog arhipelaga gdje nedostaje vode u kriznim ljetnim mjesecima. Vodonosac se spoji na okno koje se nalazi na rivi te se voda improviziranim površinskim razvodom distribuirala po selu do pojedine kućne cisterne [43].

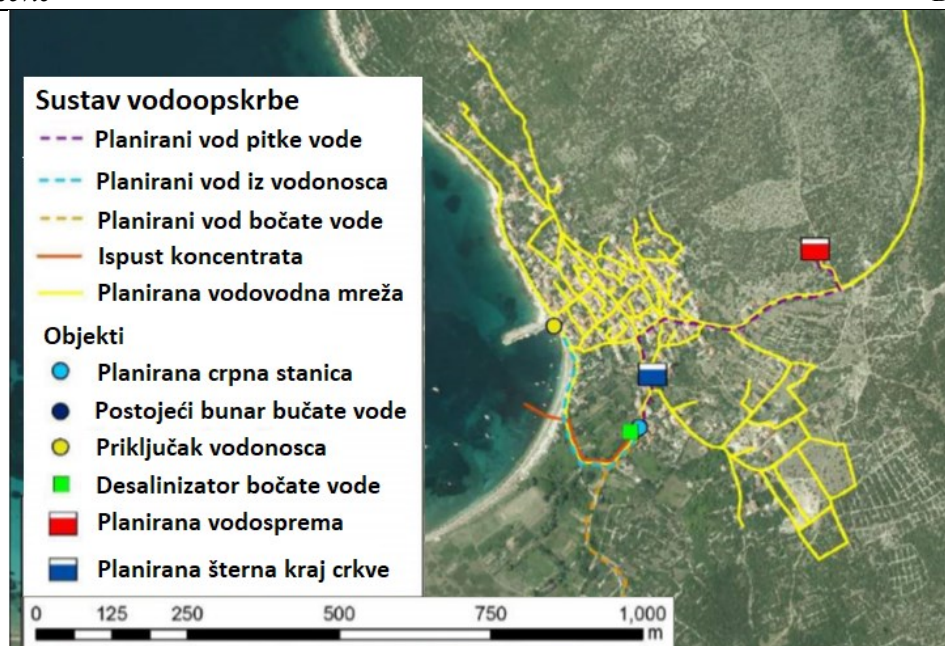
Planirana je izgradnja vodospreme (VS) na vrhu brda kod kapelice, na nadmorskoj visini od 65 m, Slika 17. Tijekom projektiranja je procijenjena potrebna proizvodnja desalinizatora od maksimalno 80 m<sup>3</sup>/dan [43].

### 3.2.1. Desalinizator

Objekt desalinizatora obuhvaća zgradu 8,0 x 6,0 m, podijeljenu na dva dijela. U prizemlju se nalazi oprema za potrebe desalinizacije, i to crpka tlačenja u pješčane filtre, postrojenje reverzne osmoze, remineralizator, crpka za tlačenje u postojeću mrežu, elektrooprema i ostala manja oprema. U podzemnom dijelu se nalaze dva bazena, pojedinačnog volumena 40 m<sup>3</sup>, i to bazen sirove bočate vode koji se napaja postojećim priključkom pumpi iz bunara, te bazen pročišćene vode koja je namijenjena za daljnje korištenje u sustavu vodoopskrbe.

Reverzna osmoza (RO) obuhvaća uređaj na kojem se provodi membranski postupak reverzne osmoze pri čemu se uz narinuti tlak ulazni tok separira na tok (cca 55%) permeata niskog sadržaja klorida i tok (cca 45%) koncentrata visokog sadržaja klorida. Tok koncentrata visokog sadržaja klorida se putem ispusta koncentrata vraća u more. Kapacitet uređaja je predviđen za količinu ulazne bočate vode od 8 m<sup>3</sup>/h, uz iskoristivost 50-55 %, te imamo konačno: protok permeata od 4,0-4,4 m<sup>3</sup>/h, a protok koncentrata od 4,0-3,6 m<sup>3</sup>/h. Uz rad 20 sati/dan, ukupna maksimalna proizvodnja pitke vode je cca 80 m<sup>3</sup>. Snaga desalinizatora iznosi 27,6 kW, što daje potrošnju od 6,9 kWh/m<sup>3</sup>.

Shema budućeg vodoopskrbnog sustava je prikazana uz napomenu da je radi preglednosti izuzet prikaz bunara bočate vode koji se nalazi još oko 300 metara južnije, Slika 17. Voda će se crpiti iz bunara te će se nakon obrade u desalinizatoru pumpati iz crpne stanice pokraj desalinizatora u vodospremu na vrhu brda. Iz vodospreme će se voda slobodnim padom distribuirati po naselju. Na slici je prikazan i ispušni koncentrat desalinizatora kao i planirani tlačni vod iz vodonosca te priključak vodonosca [43].



Slika 17. Prikaz planirane vodovodne mreže [43]

### 3.2.2. Sustav odvodnje

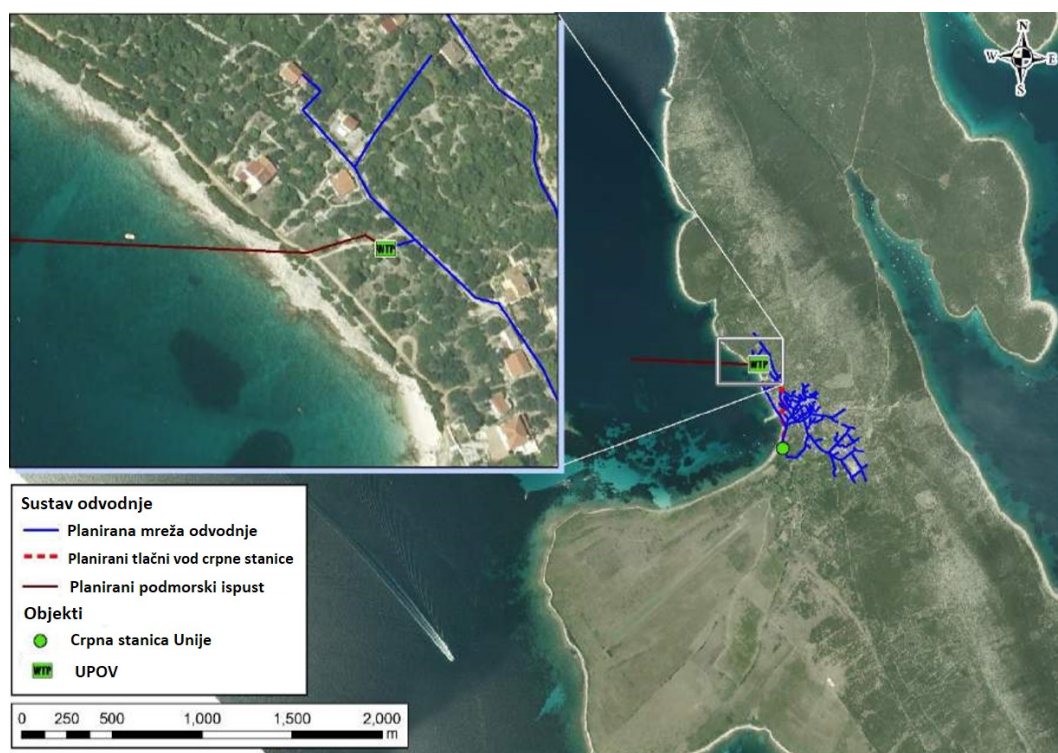
Na otoku nema izgrađenog sustava javne odvodnje. Prihvat otpadnih voda kućanstava i ugostiteljskih objekata (koji rade uglavnom ljeti), vrši se u septičke jame koje su propusne. Iz septičkih jama otpadna voda dalje prodire u podzemlje, ili se, kod objekata koji su bliže moru, procjeđuje u priobalni pojas. Obilaskom terena uočena su vidljiva zagađenja mora na pojedinim lokacijama uz samo more, a najvjerojatnije su uzrokovana procjeđivanjem otpadnih voda kroz propusno tlo.

U planu je izgradnja sustava odvodnje koji obuhvaća gravitacijsku kanalizacijsku mrežu u ukupnoj dužini od cca 5500 m, promjera 200-300 mm, položeno uglavnom u zajedničkom kanalu s mrežom vodoopskrbe. Zbog terenskih uvjeta, dio sustava će biti potrebno precrpiti lokalnom kanalizacijskom crpnom stanicom, s tlačnim vodom dužine cca 380 m. Bez obzira na mali mjerodavni protok, kao min. promjer tlačnog voda usvojeno je 80 mm, što daje (uz uvjet zadovoljenja minimalne brzine u tlačnom vodu) kapacitet crpne stanice od 4,0 l/s. Predviđena je ugradnja radne i rezervne crpke. Za potrebe eventualnog zastoja u radu crpne stanice, predviđen je retencijski prostor i sigurnosni preljev. S obzirom na broj ekvivalenata i uvjete ispuštanja otpadne vode, predviđena je izgradnja uređaja odgovarajućeg stupnja, što u ovom slučaju podrazumijeva mehanički predtretman otpadnih voda, s ispuštanjem u recipijent putem podmorskog ispusta, Slika 18.

U konkretnom slučaju, mehanički predtretman bi se sastojao od finog sita otvora 3 mm, s prethodnom zaštitnom rešetkom (mehaničkom ili automatiziranom) veličine otvora/razmaka štapova od ca 20-40 mm. Uređaj za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV) će se opremiti by-pass-om kojim se omogućuje obilazak otpadne vode u vremenu zastoja rada sita ili servisiranja, a radi boljeg isticanja iz uređaja na izlazu se može predvidjeti izvedba bazena s dozažnim sifonom prije ulaza u pomorski ispust.

Lokacija ispusta nalazi se na sjevernom dijelu naselja Unije s početkom na uređaju za pročišćavanje otpadnih voda te se nastavlja okomito prema otvorenom moru. Točka ispuštanja u more usvojena je na udaljenosti od 500 m okomito na obalu, s dubinom od cca 30 m na točki ispuštanja. S obzirom na trasu ispusta i zadovoljenje tražene udaljenosti od obale, sama dužina ispusta bi iznosila cca 650 m.

Pretpostavljena je ugradnja cijevi PEHD 160/150 mm, s time da će u daljnjoj razradi dokumentacije, obzirom na snimak podmorja, raspoloživoj lokaciji (tlocrtno i visinski) uređaja možda doći do korekcije karakteristika ispusta. Ispust će se na svom prvom dijelu (do dubine cca 10 m) zaštititi betonskim blokom radi zaštite od valovanja i mehaničkih oštećenja, a na svom daljnjem dijelu će se osigurati opteživačima radi sprječavanja isplivavanja i radi sprječavanja gibanja. Na završetku ispusta i difuzorske sekcije će se dionica ispusta podići iznad dna radi sprječavanja začepljenja i boljeg isticanja [43].



Slika 18. Prikaz planiranog sustava odvodnje [43]

## 4. METODE I MODELIRANJE

Za uspješnu analizu spona vodovodnog i elektroenergetskog sustava potrebno je koristiti dva softvera, od čega se s jednim simuliraju tokovi vode i pojave u vodovodnom sustavu, a drugim se vrši optimizacija povezujući vodovodni i EES. Softveri koji objedinjuju te dvije analize trenutno ne postoje. U tu svrhu su izabrani besplatni softveri otvorenog koda s kojima se ostavlja mogućnost za daljnju nadogradnju ili modifikaciju koda naprednijim programiranjem. Izabrani su softveri EPANET za vodovodni sustav i Calliope za linearnu optimizaciju.

### 4.1. EPANET

EPANET je softver za modeliranja sustava vodoopskrbe kojeg je razvila američka agencija za zaštitu okoliša. Omogućava simulaciju hidrauličkih pojava i kvalitete vode u zatvorenim sustavima (cijevi pod tlakom) s proizvoljnom prostornom i vremenskom rezolucijom. Razvijen je 1993. godine s ciljem da postane znanstveni alat koji unapređuje razumijevanje kretanja pitke vode u opskrbenj mreži prikazujući protoke, brzine strujanja, tlakove, koncentraciju čestica, razine napunjenosti spremnika i sl.

Softver je u javnom vlasništvu, što znači da je dostupan svima te je također otvorenog koda, pisan u C-u, čime su omogućene razne modifikacije. Njegov *engine* je postao standard u industriji vodoopskrbe jer ga koriste brojni komercijalni softveri kao što su: WaterCAD, WaterGEMS, Pipe2000, itd.

Učitavajući mapu te podešavajući udaljenosti, moguće je manualno postavljati spremnike, pumpe, cijevi, ventile, potrošače, čvorove i izvore vode s udaljenostima koje odgovaraju stvarnim. Vremenska rezolucija se može postaviti na minutnu razinu, a trajanje simulacije proizvoljno, gdje jedino ograničenje predstavljaju računalni resursi.

Vezano za vremensku rezolucije, moguće je postaviti razne dijagrame koji za svaki vremenski korak sadrže određenu vrijednost. Tako se može upravljati rad frekvencijske pumpe, gdje se zadaje kad ona radi i s kojim kapacitetom, kao i dijagram potražnje svakog potrošača.

Svaka stavka učitana na mapi ima više specifikacija koje je potrebno unijeti, primjerice:

- cijevi – duljina, promjer, hrapavost.
- potrošač – nadmorska visina, bazna potražnja, dijagram potražnje.
- spremnik – nadmorska visina, promjer, minimalna i maksimalna razina, početna razina, itd.
- pumpa – snaga, krivulja H-Q, brzina, dijagram rada pumpe, cijena energije, itd.

- ventil – promjer, vrsta, postavka (npr. zadani protok kod regulatora protoka), itd.

Rezultati simulacije se mogu prikazati u samom softveru ili eksportirati za obradu u željenom alatu [45].

#### 4.1.1. Matematičke osnove

Metode korištene u EPANET-u za rješavanje jednadžbi održanja protoka i pada tlaka koje karakteriziraju hidrauličko stanje mreže cijevi u datom momentu mogu se opisati hibridnim pristupom s čvorovima i petljama, tzv. gradijentnom metodom [46], [47]. Za  $N$  broj čvorova i  $NF$  broj fiksnih čvorova (izvori ili spremnici), pad tlaka u cijevi između dva čvora  $i$  i  $j$  zadan je s:

$$H_i - H_j = h_{ij} = rQ_{ij}^n + mQ_{ij}^2, \quad (1)$$

gdje je  $H$  = apsolutni tlak,  $h$  = pad tlaka u segmentu,  $r$  = koeficijent otpora,  $Q$  = količina protoka,  $n$  = eksponent protoka, a  $m$  = koeficijent lokalnog gubitka. Koeficijent otpora  $r$  ovisi o metodi koja se koristi za izračun linijskih gubitaka trenja, a koeficijent lokalnog gubitka  $m$  o ventilima, zakrivljenjima ili koljenima na dionici.

Drugi set jednadžbi vezan je za održavanje protoka u svim čvorovima:

$$\sum_j Q_{ij} - D_i = 0 \quad \text{za } i = 1, \dots, N, \quad (2)$$

gdje je  $D_i$  potražnja vode u čvoru  $i$  koja je prema konvenciji pozitivna ako voda utječe u taj čvor. S poznatim vrijednostima apsolutnih tlakova u fiksnim čvorovima (izvori i spremnici), traži se rješenje za sve  $H_i$  i protoke  $Q_{ij}$  koji zadovoljavaju jednadžbe (1) i (2).

Metoda gradijenata započinje rješavanje problema pretpostavkom protoka u svakoj cijevi koja ne mora nužno zadovoljiti jednadžbu kontinuiteta. Svakom iteracijom, dobiju se novi apsolutni tlakovi rješavajući matrični sustav:

$$\mathbf{AH} = \mathbf{F}, \quad (3)$$

gdje je  $\mathbf{A}$  Jacobijeva matrica koja sadrži padove tlaka ( $N \times N$ ),  $\mathbf{H}$  vektor nepoznatih tlakova u čvorovima ( $N \times 1$ ) i  $\mathbf{F}$  vektor ( $N \times 1$ ) koji uključuje korekcijski faktor:

$$F_i = \left( \sum_j Q_{ij} - D_i \right) + \sum_j y_{ij} \sum_j p_{if} H_f, \quad (4)$$

gdje se zadnji član odnosi za poveznicu čvora  $i$  s fiksnim čvorom  $f$ . Korekcijski faktor protoka  $y_{ij}$  jednak je:

$$y_{ij} = p_{ij} \left( r|Q_{ij}|^n + m|Q_{ij}|^2 \right) \text{SIGN}(Q_{ij}). \quad (5)$$

Nakon izračuna novih apsolutnih tlakova rješavajući jednadžbu (3), novi protoci se izračunaju iz:

$$Q_{ij} = Q_{ij} - \left( y_{ij} - p_{ij}(H_i - H_j) \right). \quad (6)$$

Ako je zbroj promjena protoka relativno u odnosu s protocima u svim cijevima veća od zadane tolerancije (npr. 0,001), jednadžbe (3) i (6) se rješavaju ponovno. Detaljniji opis metode rješavanja se može pronaći u EPANET-ovom priručniku [45].

Lokalni gubitci u cjevovodima se računaju prema Darcy-Weissbach-ovoj jednadžbi:

$$\frac{\Delta p}{L} = f_D * \frac{\rho}{2} * \frac{v^2}{D_e}, \quad (7)$$

gdje je  $\frac{\Delta p}{L}$  = pad tlaka po duljini cijevi,  $\rho$  = gustoća fluida,  $v$  = prosječna brzina fluida u cijevi,  $D_e$  = ekvivalentni promjer cijevi, a  $f_D$  = Darcy-jev faktor trenja koji ovisi o režimu strujanja.

Faktor trenja se računa ovisno o Reynoldsovu broju, a za laminarno strujanje ( $Re < 2000$ ) iznosi:

$$f = \frac{64}{Re}, \quad (8)$$

Za turbulentna strujanja ( $Re > 4000$ ), jednadžba glasi:

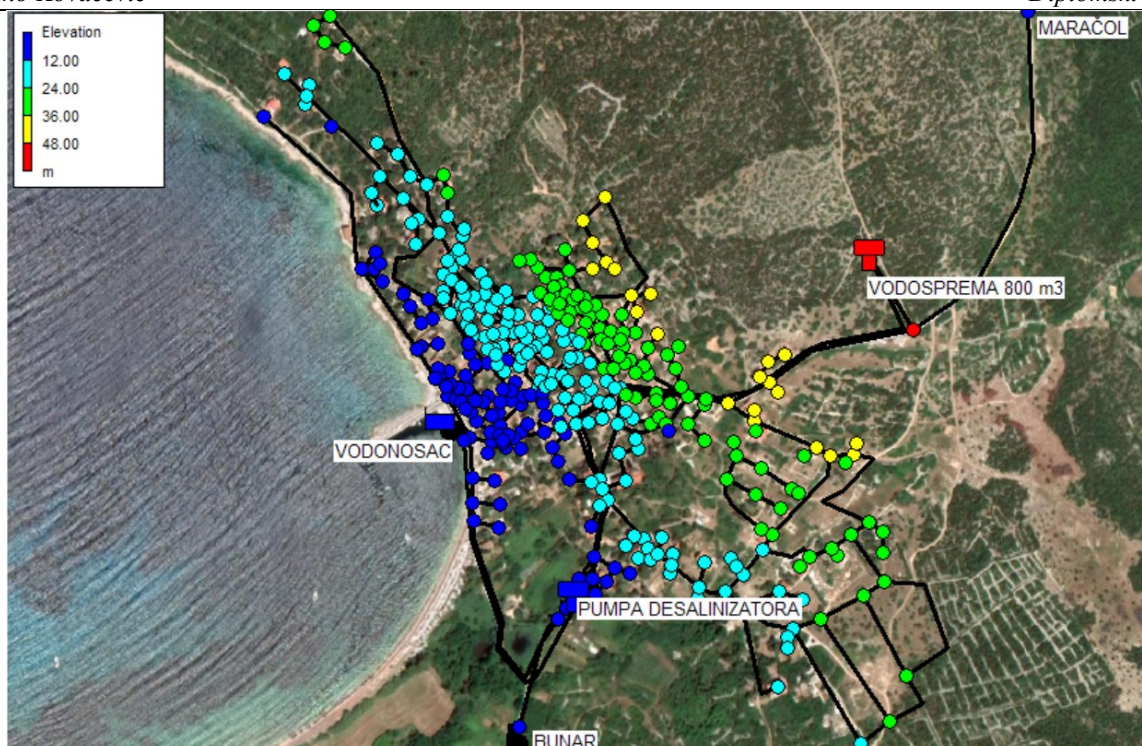
$$f = \frac{1,325}{\ln^2 \left( \frac{e}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right)}, \quad (9)$$

gdje je  $e$  = hrapavost cijevi, a  $D$  = promjer cijevi.

Strujanje u međupodručju između  $Re = 2000$  u  $Re = 4000$  se interpolira [45].

#### 4.1.2. Postavljanje modela

Postavljanje modela u EPANET-u započinje s učitavanjem mape u .jpg ili bilo kojem drugom slikovnom formatu, Slika 19. Potrebno je kalibrirati mjerilo kako bi ručno postavljena udaljenost na karti odgovarala stvarnoj udaljenosti između dvije točke.



Slika 19. Prikaz cijelog modela u EPANET-u

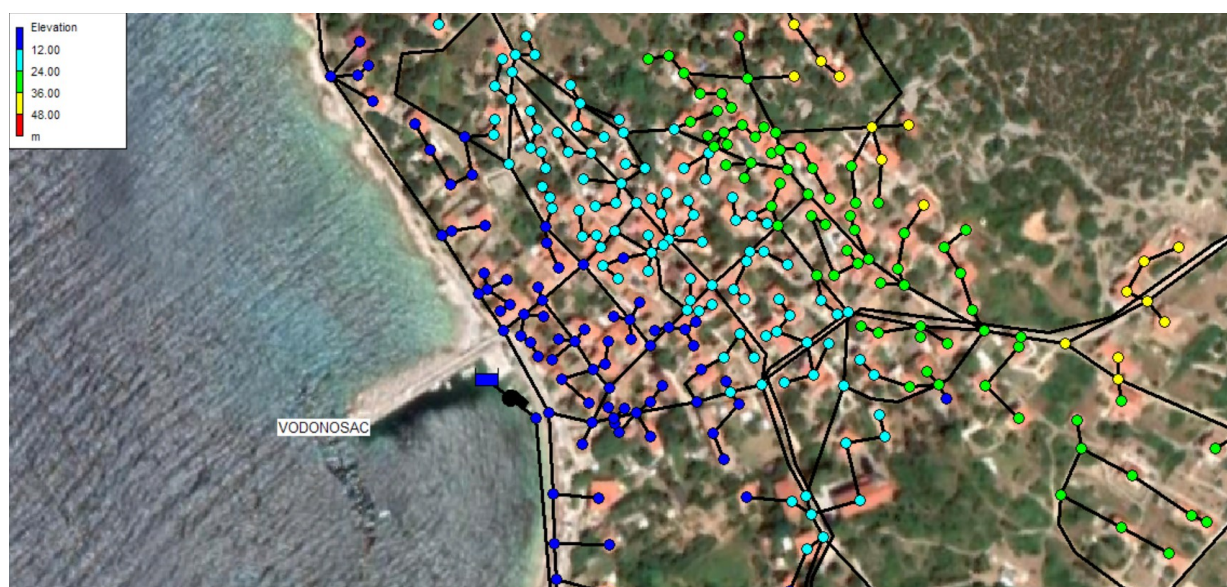
Dodaju se potrebni elementi kojima se modelira stvarno stanje, Tablica 1.

Tablica 1. Opis elemenata u EPANET-u

Element u EPANET-u	Stvarni element
Izvori vode (engl. <i>Reservoirs</i> )	Bunar, Vodonosac
Spremnici vode (engl. <i>Tanks</i> )	Desalinizator, Vodosprema
Pumpe (engl. <i>Pumps</i> )	Pumpa bunara, pumpa vodonosca, pumpa desalinizatora
Ventili (engl. <i>Valves</i> )	Regulatori protoka
Čvorovi (engl. <i>Junctions</i> )	Potrošači vode, vodovodne petlje
Cijevi (engl. <i>Pipes</i> )	Cjevovodi

Bunar i vodonosac predstavljaju beskonačne izvore koji su odgovarajućim ventilima, tj. regulatorima protoka, ograničeni na odgovarajući protok. Bunar je spojen s desalinizatorom preko svoje pumpe snage 1,5 kW, a vodonosac služi kao tehnologija koja se koristi u ljetnim mjesecima ako ne bude dovoljno vode te je spojen direktno s vodospremom preko vlastite pumpe. Spremnici vode imaju svoja ograničenja, prvenstveno volumen koji mogu popuniti kao i minimalni potrebni volumen i sl. Desalinizator je modeliran kao spremnik vode, jer se u njemu ionako nalazi spremnik, a tehnologija desalinizacije ne postoji u EPANET-u. To ipak nije

nedostatak jer desalinizator svojim djelovanjem ne utječe na tokove vode i tlakove već samo pročišćava bočatu vodu. Bitna stavka desalinizatora je potrošnja energije, no to će se analizirati u Calliope-u. Vodosprema je također modelirana kao spremnik vode volumena  $800 \text{ m}^3$  postavljen na brdu s odgovarajućom nadmorskom visinom. Puni se vodom iz desalinizatora preko dvije pumpe desalinizatora pojedinačne snage  $1,5 \text{ kW}$  te visinskim padom distribuira vodu po naselju bez potrebe za dodatnim pumpama. Čvorovi se modeliraju kao točke na krajevima određenih cjevovoda. Dakle, čvor može biti krajnja točka distribucijskog sustava koja će imati zadanu potrošnju, ali može biti i točka koja služi kao račva u kojoj se spaja više cjevovoda bez ikakve potrošnje, Slika 20.



Slika 20. Detaljniji prikaz modela u središtu naselja

## 4.2. Calliope

Calliope je razvojni alat otvorenog koda za modeliranje energetske sustava, baziran na pythonu. Razvijen je na tehnološkom institutu (ETH) u Zürichu, a fokus mu je na fleksibilnosti te visokoj prostornoj i vremenskoj rezoluciji. Optimizaciju vrši koristeći linearno programiranje ugrađenim besplatnim GLPK solverom ili komercijalnim solverima kao što su CPLEX ili Gurobi. Za potrebe ovog rada, preuzeta je akademska licenca Gurobija koji pokazuje najbolje rezultate uz najkraće vrijeme rješavanja modela [48].

Minimalna vremenska razlučivost je satna, a prostorna ostaje proizvoljna s mogućnosti korištenja ugrađene mape u koju je potrebnu upisati geografske koordinate lokacije. Jedino ograničenje veličine modela su računalni resursi. Kao i u EPANET-u, moguće je dodati dijagrame koji u vremenskom koraku sadržavaju vrijednosti, primjerice potražnja za



električnom energijom, potražnja za vodom, proizvodnja PV elektrane i sl. Rezultati se mogu prikazati unutar pythona, tj. jupytera, a postoji mogućnost i za spremanje rezultata u .csv formatu.

Calliope izgrađuje model na ovaj način: tehnologije opskrbe uzimaju resurse koji se nalaze izvan domene modela te ih pretvaraju u specifične nositelje energije u sustavu. Potrebno je unijeti lokacije na kojima se nalaze te tehnologije. Tehnologija prijenosa omogućava kretanje energije putem nositelja s jedne lokacije na drugu, dok tehnologije konverzije mogu pretvoriti jednog nositelja energije u drugi. Tehnologija potražnje uklanja nositelja energije iz sustava, dok ga tehnologija pohrane može pohranjivati na određenoj lokaciji te ponovno vratiti u sustav.

**Tablica 2. Primjeri tehnologija u Calliope-u [48]**

<b>Tehnologija</b>	<b>Primjer</b>
Opskrba	Termoelektrana, PV elektrana, vjetroelektrana
Resurs	Gorivo (ugljen, plin), osunčanost plohe, brzina vjetra
Nositelji energije	Električna energija, plin, toplina
Prijenos	Dalekovod, plinovod, cjevovod
Konverzija	Kogeneracijsko postrojenje
Potražnja	Potražnja za el. energijom, plinom, toplinom
Pohrana	Baterija, spremnik plina

Prednost Calliopea je mogućnost dodavanja proizvoljnih varijabli, primjerice vode u ovom slučaju, iako je Calliope prvenstveno napravljen da bi radio s energetske nositeljima energije poput električne energije ili plina. Voda se dodaje kao nositelj čiji izvor u sustavu je konverzija tehnologijom desalinizacije iz električne energije, a ponor je potražnja za vodom, dok se pohranjivati može u spremnike vode. Na taj način se otvara mogućnost za povezivanje elektroenergetskog i vodoopskrbnog sustava te optimiziranje rada uz minimiziranje troškova. Generalno, simulacija se može postaviti u dva načina rada: *plan* i *operate*. Način rada *plan* se koristi za energetske planiranje gdje se postavljaju tehnologije koje se mogu ugraditi u modelu te njihove maksimalne i/ili minimalne vrijednosti. Uz to su naravno postavljene i sve ostale vrijednosti kao što su troškovi i dijagrami proizvodnje i potrošnje. Calliope tada računa koje tehnologije će ugraditi u sustav i s kojim kapacitetom za optimalnu proizvodnju energije s minimalnim troškovima. *Operate* način rada podrazumijeva gotovi sustav gdje su već zadane tehnologije sa svojim kapacitetima i troškovima pa Calliope samo optimizira njihovo korištenje [48].

### 4.2.1. Linearno programiranje

Linearno programiranje je grana matematike koja se bavi problemom optimizacije sustava unutar zadanih ograničenja. Najčešći problemi su minimiziranje troškova ili maksimiziranje korisnosti ili zarade, primjerice u ekonomiji, logistici, marketingu, telekomunikacijama i sl. U energetici se najčešće koristi za minimiziranje troškova nekog sustava optimizirajući rad određenih komponenti tog sustava uz zadovoljavanje zadanih ograničenja [49].

Primjerice, potrebno je minimizirati troškove sustava:

$$\min \left( \sum_{j=1}^n c_j x_j \right), \quad (10)$$

uz ograničenja:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad i = 1, \dots, p, \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i \quad i = 1, \dots, q, \quad (12)$$

gdje su  $x_j, j=1, \dots, n$  projektne varijable, a  $a_{ij}, b_i$  i  $c_j$  zadani realni brojevi koji predstavljaju ograničenja i specifične cijene.

### 4.3. Modeliranje ulaznih podataka

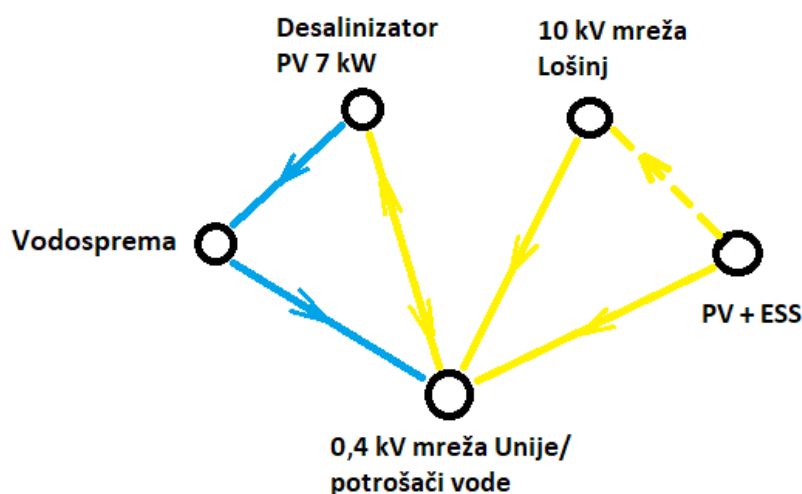
Modeliranje ulaznih podataka većim dijelom je vezano za softver Calliope u kojem je potrebno zadati lokacije i tehnologije. Modeliranje potražnje vode je jedini podataka koji je potreban za simulaciju u EPANET-u, kao i optimizaciju u Calliopeu. Lokacije koje će biti korištene su: 10 kV mreža s Lošinja, PV+ESS, Desalinizator i PV 7 kW, Spremnik vode i 0,4 kV mreža na Unijama koja predstavlja potrošače vode i električne energije. Svaka lokacija se sastoji od jedne ili više tehnologija u Calliope modelu, Tablica 3.

Tablica 3. Odgovarajuće lokacije i tehnologije u Calliope-u

Lokacija	Tehnologija
10 kV mreža Lošinj	Opskrba (uvoz)
PV+ESS	Opskrba (PV) i pohrana (ESS)
0.4 kV mreža Unije	Potražnja (električna energija, voda i pumpe)
Desalinizator i PV 7 kW	Konverzija (Desalinizator) i opskrba (PV 7 kW)
Spremnik vode	Pohrana (vodosprema)

Prikazane su lokacije unesene u model, kao i tokovi vode (plavom bojom) i električne energije (žutom bojom), Slika 21. Posebno je bitno obratiti pozornost na spajanje lokacija odgovarajućim tehnologijama prijenosa, električnom mrežom ili vodovodnim cijevima, kao i na smjer toka električne energije i vode. Vezano za lokaciju „PV+ESS“, ona je povezana s distribucijskom mrežom na Unijama preko tehnologije prijenosa u Calliope-u, no ta poveznica služi samo za tok energije prema potrošačima na Unijama. Energija koja se koristi za izvoz ne ide tim smjerom u modelu Calliope-a već je modelirana preko tzv. *export*-a kojim ona jednostavno ide izvan domene modela. Dakle za tu energiju izvoza nije potrebno spajanje dvije lokacije. Iz toga razloga je napravljena fiktivna iscrtana linija koja povezuje „PV+ESS“ lokaciju s lokacijom „10 kV mreža Lošinj“ da se pokaže kako se energija izvozi prema Lošinju.

Dakle, tokovi energije kako su prikazani na slici ne odgovaraju u potpunosti onima u stvarnosti. Razlog tomu je specifičnost Calliope-a u modeliranju izvozne energije. Ista ova shema bi morala imati još jednu poveznicu u smjeru od distribucijske mreže na Unijama do 10 kV mreže Lošinja gdje bi se izvozila energija, kako je prethodno prikazano na elektrotehničkoj shemi u Poglavlju 3.1, Slika 15. Na taj način bi bili prikazani stvarni tokovi energije



Slika 21. Shema spajanja lokacija u Calliope-u

Što se tiče tehnologija koje su korištene u modelu, potrebno ih je podijeliti na više dijelova, kao što su proizvodnja, odnosno izvorni električne energije, potražnja, odnosno ponori električne energije i vode, tehnologija konverzije električne energije u vodu, te tehnologije pohranjivanja električne energije i vode, Tablica 4.

Tablica 4. Ulazni podatci u model Calliope-a

Opis	Kratica	Vrsta ulaznog podatka	Tehnologija
<b>Proizvodnja/izvori električne energije</b>			
PV elektrana 1300 kW	$P_{PV1300}$	Fiksni dijagram	Opskrba
PV elektrana 7 kW	$P_{PV7}$	Fiksni dijagram	Opskrba
Uvoz električne energije	$P_{uvoz}$	Varijabla	Opskrba
<b>Potražnja/ponori el. energije i vode</b>			
Potražnja za vodom	$D_{voda}$	Fiksni dijagram	Potražnja
Potražnja za el. energijom	$D_{el.en.}$	Fiksni dijagram	Potražnja
Izvoz električne energije	$D_{izvoz.}$	Varijabla	Potražnja
<b>Konverzija el. energije u vodu</b>			
Desalinizator	$C_{desal}$	Varijabla	Konverzija
<b>Pohrana el. energije i vode</b>			
Baterija	$E_{bat}$	Varijabla	Pohrana
Spremnik vode	$E_{voda}$	Varijabla	Pohrana

Fotonaponska elektrana proizvodi do 1300 kW električne energije, od čega je maksimalno 1000 kW zakupljeno za prodaju, a ostatak od 300 kW preostaje za punjenje baterije. Zadatak simulacije, između ostalog, jest da optimizira prodaju energije i punjenje baterije da bi se ostvarila najveća zarada. Izvoz električne energije, iako spada pod stavku potražnje, predstavlja slobodnu varijablu ponora električne energije gdje se optimizira njegova vrijednost u svrhu zarade. Desalinizator je ograničen na maksimalnu snagu od 27,6 kW, odnosno 3,33 m<sup>3</sup>/h, dok je spremnik vode ograničen na 800 m<sup>3</sup> zapremnine. Baterija je ograničena na 400 kW snage, odnosno 1600 kWh pohrane električne energije, Tablica 5.

Tablica 5. Ograničenja varijabli modela

Tehnologija	Ograničenja
Uvoz električne energije	$0 < P_{uvoz} < 400 \text{ kW}$
Izvoz električne energije	$0 < D_{izvoz.} < 1000 \text{ kW}$
Desalinizator	$0 < C_{desal} < 27,6 \text{ kW}$
Baterija	$0 < E_{bat} < 1600 \text{ kWh}$
	$-400 < P_{bat} < 400 \text{ kW}$
Spremnik vode	$0 < E_{voda} < 800 \text{ m}^3$

U dodatku u prilogu je priložen kod iz Calliope-a.

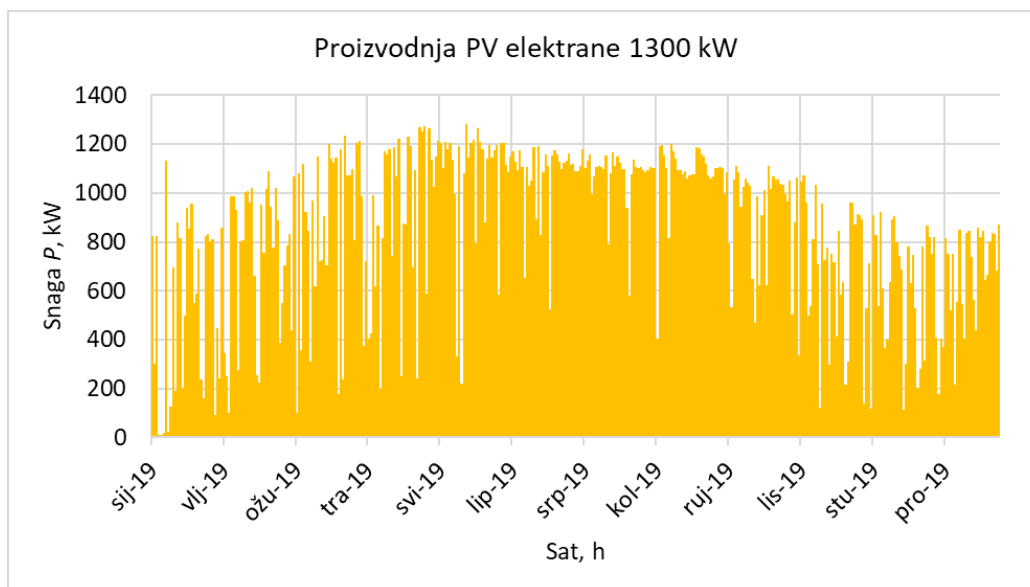
### 4.3.1. *Proizvodnja fotonaponske elektrane*

Kao ulazni podatak u Calliope potrebno je postaviti dijagram proizvodnje električne energije iz fotonaponske elektrane  $P_{PV1300}$ . Za izradu dijagrama proizvodnje električne energije koristila se „PVGIS estimates of solar electricity generation“ online aplikacija, Tablica 6. Podatci o nagibu i snazi elektrane preuzeti su iz INSULAE projekta. Gubitci u sustavu pri izračunu su zanemareni jer nazivna istosmjerna snaga iznosi 1560 kW što znači da su gubitci na inverteru već uzeti u obzir [50].

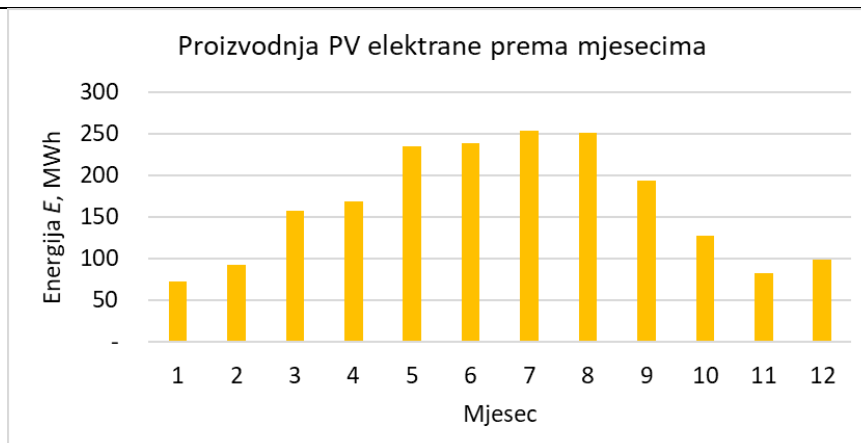
**Tablica 6. Ulazni podatci u PVGIS [51]**

Baza podataka	PVGIS-SARAH
PV tehnologija	Kristalni silicij
Instalirana snaga	1300 kW <sub>p</sub>
Gubitci u sustavu	0%
Nagib	23%
Azimut	0%

Na taj način dobivena je procjena godišnje proizvedene električne energije od 1971,7 MWh elektrane, Slika 22, Slika 23. Odgovarajući faktor kapaciteta iznosi 17,3%.



**Slika 22. Dijagram proizvodnje električne energije PV elektrane od 1300 kW na satnoj razini**

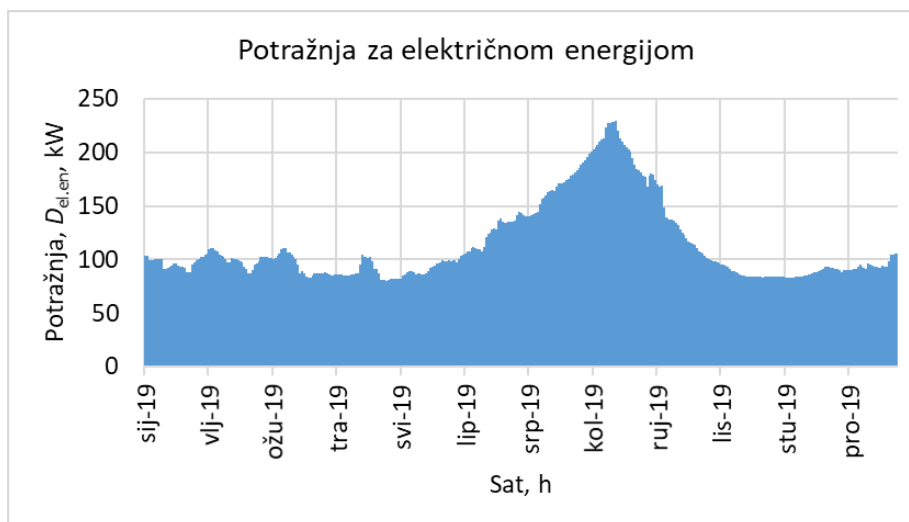


**Slika 23. Dijagram proizvodnje električne energije PV elektrane od 1300 kW na mjesečnoj razini**

Isti ulazni podatci korišteni su za malu fotonaponsku elektranu  $P_{PV7}$  s korigiranom nominalnom snagom.

#### 4.3.2. Potražnja za električnom energijom

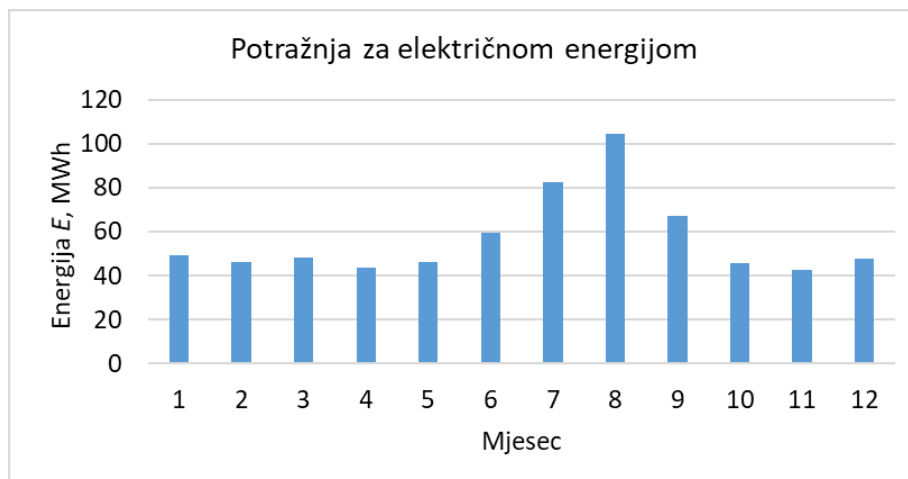
Za uspješno postavljanje i rješavanje optimizacije u Calliope-u, potrebno je unijeti dijagram potražnje za električnom energijom  $D_{el.en.}$ . Potrebni podatci su modelirani za 2019. godinu, te su preuzeti iz INSULAE projekta, Slika 24. Ukupna potražnja energije na razini cijele godine iznosi 589 MWh, najviša satna potražnja iznosi 229,7 kW 17.kolovoza u 20 sati, a najniža 41,9 kW 28. travnja u 4 sata.



**Slika 24. Dijagram potražnje za električnom energijom**

Sumirana je potražnja za električnom energijom po mjesecima, Slika 25. Vidljivo je da je ukupna količina električne energije gotovo jednaka van sezone od listopada do svibnja, dok se značajan porast vidi tijekom srpnja i kolovoza. Zbog velikog broja ljudi na otoku u ljetnim

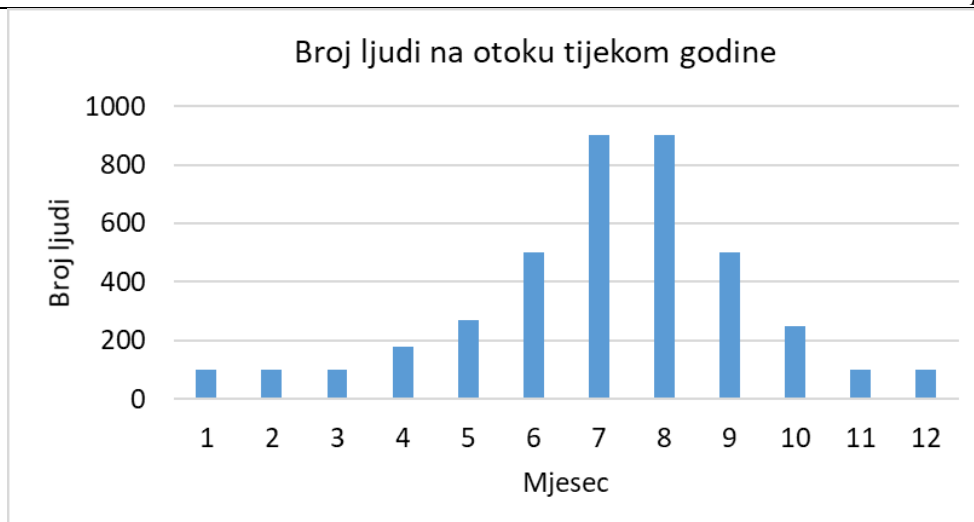
mjesecima, zajedno s dodatnom potrošnjom koja nastaje korištenjem rashladnih uređaja, očekivano je da će ljetni mjeseci biti najzahtjevniji za EES. Ostatak godine, potražnja je gotovo konstantna. Tijekom zime je najmanji broj ljudi na otoku, međutim znatan je udio električne energije koja se koristi za grijanje. Tijekom proljeća nestaje potreba za grijanjem, ali je veće opterećenje zbog demografskog rasta na otoku.



Slika 25. Dijagram potražnje za električnom energijom sumiranom po mjesecima

#### 4.3.3. Modeliranje potražnje vode

Na Unijama trenutno ne postoje pametna mjerila uz pomoć kojih bi se mogli dobiti kvalitetni podatci o potrošnji vode na osnovu kojih bi se moglo modelirati potrošnju vode. S obzirom na to da nije bilo dostupnih podataka o potrošnji vode na Unijama, morale su se uvesti određene pretpostavke. Početna pretpostavka pri modeliranju vode bila je vodoopskrbna norma od 130 l/osobi/dan, prema elaboratu zaštite okoliša [43]. Na taj način se može procijeniti potreba za vodom ako je poznato koliko se ljudi nalazi na otoku u svakom trenutku. Uz pomoć procjene broja turista na otoku tijekom svakog mjeseca, pridodajući im stalno stanovništvo, moguće je dobiti približan broj ljudi na otoku, Slika 26.



Slika 26. Dijagram broja ljudi na otoku tijekom godine [52]

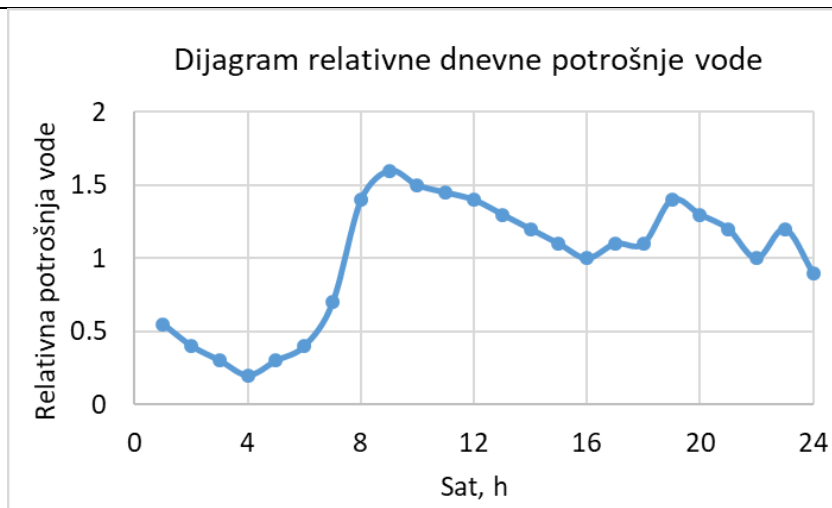
Interpolacijom broja ljudi na otoku na tjednoj bazi, s pretpostavkom da se turisti izmjenjuju svaki tjedan, dobije se graf potrošnje vode s konstantnim vrijednostima tijekom tjedna, Slika 27.



Slika 27. Dijagram potrošnje vode nakon tjedne interpolacije

Pošto se EES simulira na satnoj razini, potrebno je i vodovodni sustav simulirati na istoj. Uz pretpostavku o jednakoj potrošnji tijekom tjedna, bez obzira o kojem danu se radi, moguće je unijeti graf satne potrošnje jednog dana i tako dobiti krajnji rezultat – potrošnju vode na satnoj razini tijekom cijele godine  $D_{voda}$ . Dijagram relativne dnevne potrošnje vode je preuzet iz literature za slučaj u Amsterdamu, Slika 28.

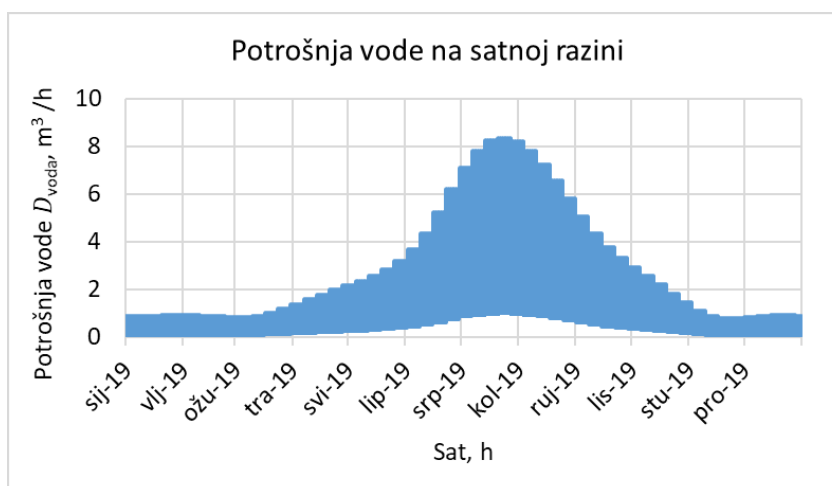




Slika 28. Dijagram relativne dnevne potrošnje vode [53]

Potrebno je napomenuti da satna razina potrošnje vode nema utjecaj na krajnji rezultat simulacije zbog same prirode vodovodnih sustava. Naime, za razliku od EES-a, vodovodni sustavi imaju puno veće i puno jeftinije mogućnosti pohrane. Stoga nije toliko bitno pokrivanje vršnog opterećenja kao kod EES-a, već pokrivanje potreba za vodom na tjednoj, mjesečnoj i godišnjoj razini.

Nakon implementacije dijagrama relativne dnevne potrošnje vode, prikazana je potrošnja vode na satnoj razini tijekom cijele godine, Slika 29.



Slika 29. Dijagram godišnje potrošnje vode na satnoj razini

#### 4.3.4. Troškovi

Calliope koristi unos troškova pojedinih tehnologija kao cilj optimizacije postizući minimalni ukupni trošak sustava. U analizi koja je provedena u ovom radu, gdje su zadane fiksne vrijednosti kapaciteta tehnologija, investicijski trošak tehnologija služi samo za računanje

LCOE vrijednosti pojedinačne tehnologije. S druge strane, troškovi održavanja i troškovi korištenja tehnologija, kao što su referentna cijena otkupa električne energije PV elektrane ili cijena uvozne električne energije, uvelike utječu na model i njegovu optimizaciju. Model će birati korištenje tehnologije koja je njemu u tom trenutku najjeftinija bez obzira na njezinu početnu cijenu (investicijski trošak). Iz tog razloga, nisu analizirane cijene vodenih spremnika i cjevovoda jer nisu poznati njihovi troškovi, a ne bi imale utjecaj na krajnji rezultat.

Svaka korištena tehnologija ima neke troškove povezane s njezinim korištenjem. Desalinizator je prikazan u istoj tablici kao i tehnologije povezane s električnom energijom iako se on direktno ne može uspoređivati s njima, Tablica 7.

Cijena investicijskog troška desalinizatora se najčešće promatra u novčanoj jedinici podijeljenoj s količinom  $m^3$  proizvedenih u danu. Dobivena je vrijednost ručno izračunata s točnim podacima za desalinizator na Unijama [54]. U odnosu na slučajeve velikih desalinizatora u svijetu, koji proizvode preko 100.000  $m^3$  u danu, desalinizator na Unijama je nekoliko puta skuplji gledajući specifičnu cijenu [55]. Objašnjenje se krije u ekonomiji velikih razmjera.

Cijena održavanja desalinizatora nije analizirana u radu jer nije potrebna za analizu u Calliope-u, te se njegovi troškovi neće detaljno analizirati. Svi troškovi vezani za desalinizator su korišteni isključivo radi optimizacije modela. Umjesto cijene održavanja, bitna stavka pri radu desalinizatora je cijena električne energije  $c_{desal,i}$  koja se plaća prema odgovarajućoj tarifi. Prema podacima koje je ustupio ViOCL, korištena je cijena električne energije koju troši desalinizator od 0,8828 kn/kWh u visokoj tarifi (VT), i 0,5173 kn/kWh u niskoj tarifi (NT), gdje su u obzir uzeti troškovi mrežarine te opskrbe, zajedno s troškom naknade za poticanje proizvodnje iz OIE.

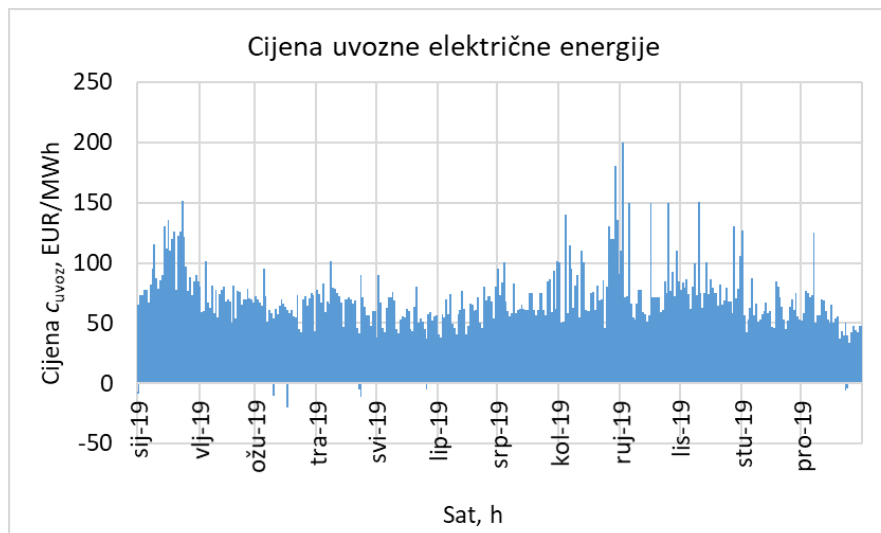
**Tablica 7. Cijene tehnologija**

<b>Tehnologija</b>	<b>Investicijski trošak</b>	<b>Troškovi održavanja i osiguranja</b>
PV elektrana 1300 kW	900 EUR/kW [56]	5 EUR/kW [59]
PV elektrana 7 kW	1125 EUR/kW [57]	10 EUR/kW [59]
Baterija	300 EUR/kWh [58]	8.81 EUR/kW [60]
Desalinizator	6600 EUR/( $m^3$ /dan) [54]	

Sve cijene su preuzete ili ekstrapolirane za 2019. godinu. Sve tehnologije su analizirane s kamatnom stopom od 0,1 uz procijenjeni životni vijek od 25 godina za PV elektrane i bateriju, te 20 godina za desalinizator [55].

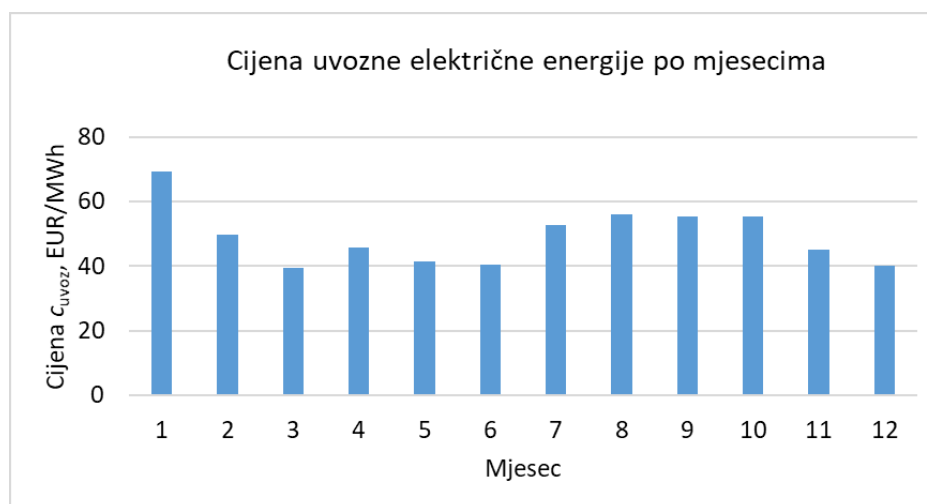
#### 4.3.5. Uvozna električna energija

Cijena uvoza električne energije preuzeta je s CROPEX-a za 2019. godinu te prikazana i unesena u softver na satnoj razini, Slika 30. Vidljivo je da je u nekim trenucima u godini cijena uvozne električne energije manja od nule.



Slika 30. Dijagram cijene uvozne električne energije na satnoj razini [61]

Ista ta cijena je prikazana uprosječena za svaki mjesec 2019. godine, Slika 31.



Slika 31. Dijagram cijene uvozne električne energije na mjesečnoj razini [61]

Pri optimizaciji i pokretanju modela, izuzetno je bitan odnos cijene uvoza električne energije i referentne cijene (RC) po kojoj se prodaje električna energija proizvedena u fotonaponskoj elektrani. Taj međudodnos dirigira korištenje baterije ili uvoza za pokrivanje potreba otoka pri noćnom nedostatku električne energije iz PV-a. U referentnom scenariju je korištena vrijednost RC od 70 EUR/MWh [62]. Uočljivo je da će, u prosjeku, uvozna cijena biti niža od otkupne cijene električne energije.

#### 4.4. Matematički model

Nakon objašnjenja funkcioniranja softvera i prikazanih ulaznih podataka, potrebno je opisati matematički model koji se koristio u zadatku. Matematički model zadatka je vezan isključivo za softver Calliope i linearnu optimizaciju EES-a povezanog s vodovodnim sustavom.

Ulazni podatci u model su: proizvodnja, odnosno izvori električne energije, tehnologija konverzije električne energije u vodu, tehnologije pohranjivanja električne energije i vode, te potražnja za električnom energijom i vodom. Potrebno je maksimizirati zaradu sustava koji se sastoji od sume specifičnih troškova i potrošnji odgovarajućih tehnologija u  $i$ -tom vremenskom koraku, koji je za potrebe ove simulacije odabran kao satni:

$$\max (c_{izvoz}D_{izvoz,i} - c_{uvoz,i}P_{uvoz,i} - c_{desal,i}C_{desal,i} - \sum_i c_{odr}P_{teh,i}) \text{ [EUR]}. \quad (13)$$

Jedini pozitivni član jednadžbe (4) je zarada od izvoza električne energije, dok su negativni članovi uvoz električne energije, trošak električne energije za pogon desalinizatora prema odgovarajućoj tarifi, te troškovi održavanja i osiguranja.

Posljednji član jednadžbe predstavlja sumu troškova održavanja i osiguranja korištenih tehnologija:

$$\sum_i c_{odr}P_{teh,i} = c_{odr,PV}(P_{PV1300,i} + P_{PV7,i}) + c_{odr,bat}P_{bat,i} + c_{odr,des}C_{desal,i} \text{ [EUR]}. \quad (14)$$

Ograničenja modela počinju s jednadžbama očuvanja energije i mase. Te dvije jednadžbe se promatraju zasebno, svaka sa svojim ograničenjima, a povezane su preko tehnologije desalinizacije.

$$D_{el.en,i} + C_{desal,i} + D_{izvoz,i} = P_{PV1300,i} + P_{PV7,i} + P_{bat,i} + P_{uvoz,i} \text{ [kW]}, \quad (15)$$

Ograničenja modela sa strane EES su većinom vezana za snage i kapacitete tehnologija:

$$0 \leq C_{desal,i} \leq 27,6 \text{ [kW]}, \quad (16)$$

$$0 \leq D_{izvoz,i} \leq 1000 \text{ [kW]}, \quad (17)$$

$$0 \leq P_{PV1300,i} \leq 1300 \text{ [kW]}, \quad (18)$$

$$0 \leq P_{PV7,i} \leq 7 \text{ [kW]}, \quad (19)$$

$$0 \leq P_{bat,i} \leq 400 \text{ [kW]}, \quad (20)$$

$$0 \leq E_{bat,i} \leq 1600 \text{ [kWh]}, \quad (21)$$

$$0 \leq P_{uvoz,i} \leq 400 \text{ [kW]}, \quad (22)$$

Baterija je u jednadžbi (6) označena s pozitivnim predznakom što znači da ona predaje energiju u sustav. Njezino punjenje se odvija preko PV elektrane pa je njezin negativni predznak matematičke jednadžbe sadržan u varijabli  $P_{PV300,i}$  koja predstavlja onaj dio proizvedene električne energije iz PV 1300 kW koja se koristi za punjenje baterije. Dakle,  $P_{PV1300,i}$  je fiksni dijagram proizvedene električne energije kojim se opskrbljuju dvije varijable:  $P_{PV300,i}$  za punjenje baterije te izvoz  $D_{izvoz,i}$ .

$$P_{PV1300,i} = P_{PV300,i} + D_{izvoz,i} \quad (23)$$

$$0 \leq P_{PV300,i} \leq 300 \text{ [kW]}, \quad (24)$$

Poveznica modela vode i električne energije je tehnologija desalinizacije pri čemu je potrebno uzeti u obzir efikasnost pretvorbe kWh/m<sup>3</sup>, odnosno kW/(m<sup>3</sup>/h). Modeliranje vode počinje s jednadžbom održanja mase, odnosno volumena vode pošto je pretpostavljena konstantna gustoća zbog jednolikog rasporeda temperature i relativno niskih tlakova.

$$D_{voda,i} \pm P_{voda,i} = C_{desal,i} \text{ [m}^3\text{/h]}, \quad (25)$$

Ograničenja modela s vodovodne strane su:

$$0 \leq E_{voda,i} \leq 800 \text{ [m}^3\text{]}, \quad (26)$$

$$0 \leq C_{desal,i} \leq 3,33 \text{ [m}^3\text{/h]}, \quad (27)$$

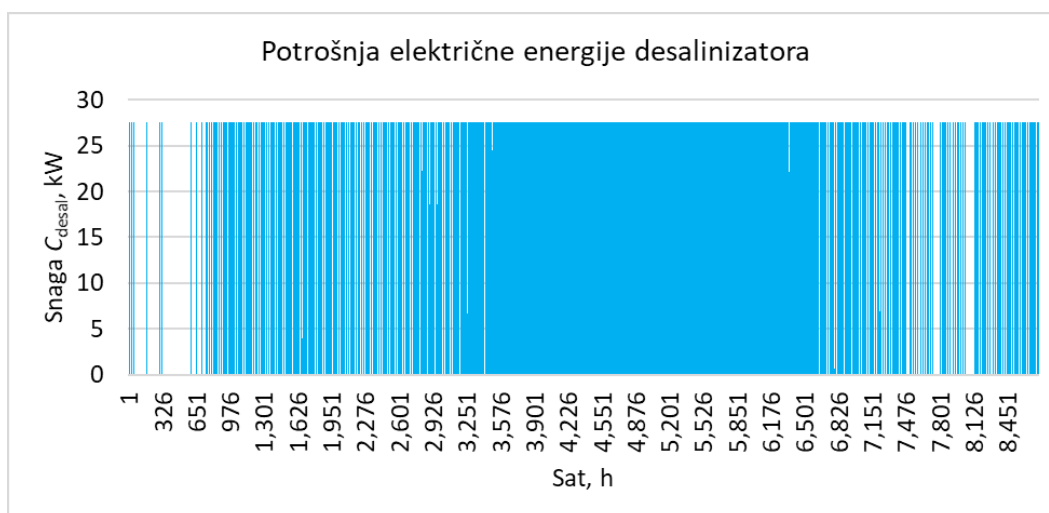
$P_{voda,i}$  predstavlja varijablu toka voda u spremnik vode, dok  $E_{voda,i}$  predstavlja varijablu volumne razine napunjenosti spremnika.

## 5. REZULTATI

Za uspješnu analizu potrebno je koristiti softvere u sljedećem redoslijedu:

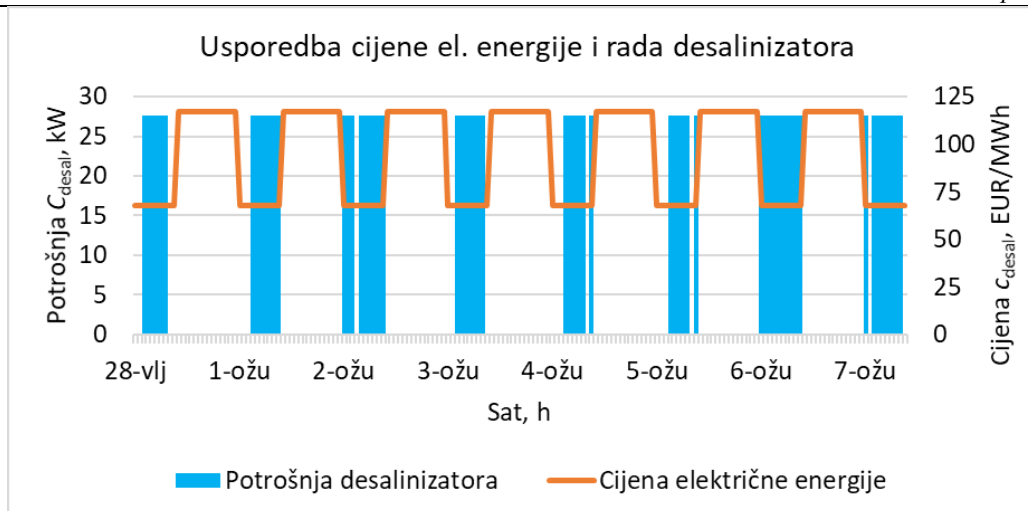
- Pokrenuti prvu optimizaciju u Calliope-u s podacima zadanim u prethodnom poglavlju 4.3. Rezultat optimizacije je dijagram rada desalinizatora
- Pokrenuti simulaciju u EPANET-u kako bi se validirali rezultati u Calliope-u, prikazale vodovodne prilike u mreži i dobili dijagrami potrošnje pumpi.
- Pokrenuti drugu optimizaciju u Calliope-u s dijagramom potrošnje pumpi kao ulaznim podatkom i dobiti krajnje rezultate.

Prikazan je rad desalinizatora nakon prve optimizacije, odnosno njegova potrošnja električne energije, Slika 32. Taj dijagram je potreban kao ulazni podatak u EPANET.



**Slika 32. Dijagram potrošnje električne energije desalinizatora**

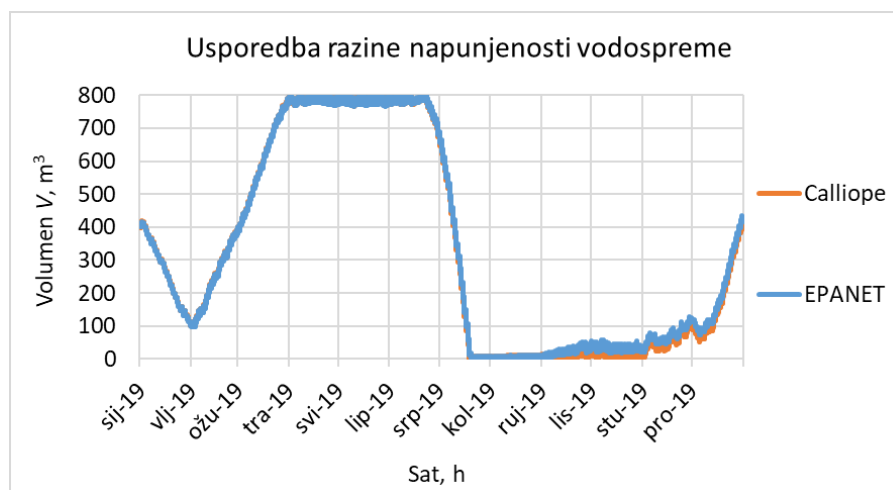
U ljetnom periodu desalinizator radi konstantno punim kapacitetom zbog velikog opterećenja i potražnje za vodom. Ukupna potrošnja desalinizatora tijekom godine iznosi 121,303 MWh. Prikazan je rad desalinizatora usporedno s kretanjem cijene električne energije prema odgovarajućoj tarifi opisanoj u poglavlju 4.3.4, Slika 33. Dijagram prikazuje snagu i cijenu na vertikalnoj osi u odgovarajućim mjerilima, dok je na horizontalnoj osi prikazan tjedan u ožujku na satnoj razini. Vidljivo je da rad desalinizatora prati kretanje cijene električne energije tako što se gasi danju u području visoke tarife, a maksimalnim kapacitetom radi noću u području niske tarife.



Slika 33. Prikaz rada desalinizatora u ovisnosti o cijeni električne energije prema tarifi

### 5.1. Simulacija u EPANET-u

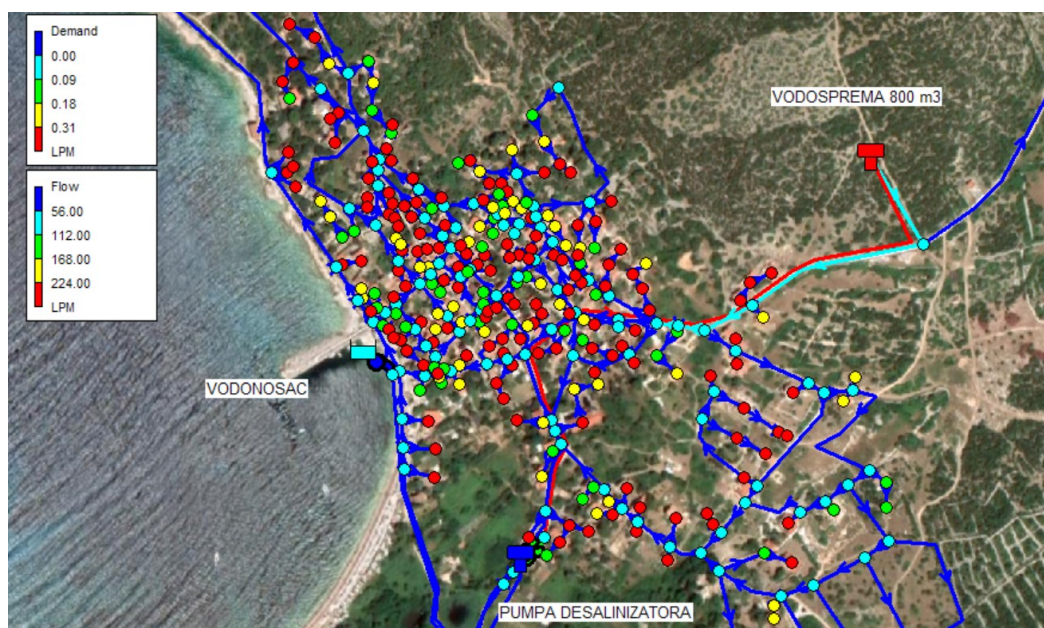
Nakon unošenja rada desalinizatora u EPANET, potrebno je validirati rezultat iz oba softvera, Slika 34. Vidljivo je da se dijagram razine napunjenosti vodospreme koja je izračunata u Calliope-u zadovoljavajući preklapa s istim dijagramom iz EPANET-a. Time je validirana povezanost između dva softvera i osigurano da se koriste ispravni podatci između njih.



Slika 34. Usporedba razine napunjenosti spremnika u Calliope-u i EPANET-u

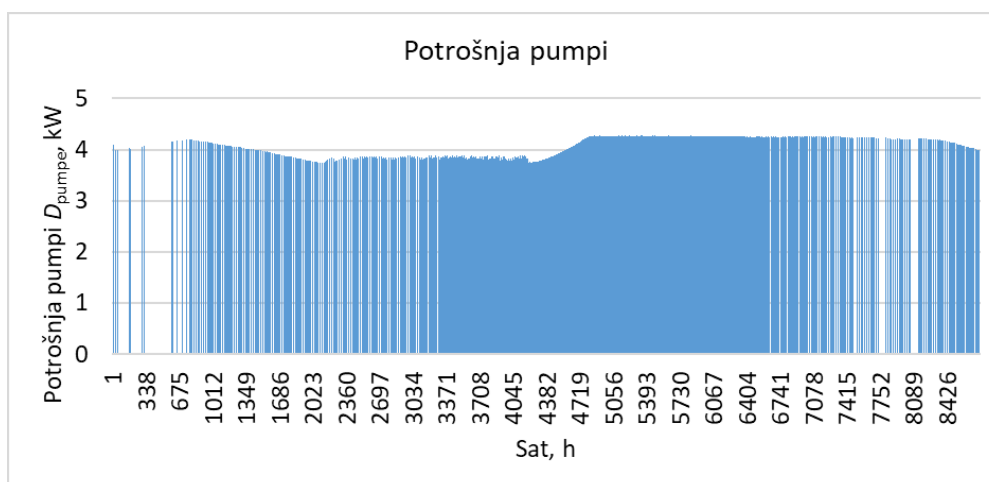
Za svaki sat u godini je moguće prikazati tokove vode kroz cjevovode vodovodne mreže, Slika 35. Za svakog potrošača (kružići na slici) se može prikazati tlak i potrošnja vode u svakom satu, a za svaki cjevovod (linije) se može prikazati protok ili brzina vode u datom trenutku. Zbog nedostupnosti konkretnijih podataka o potrošnji vode, zbog čega se ona morala modelirati, ovaj prikaz trenutno nije pogodan za daljnju analizu. Također, svakom kućanstvu je

nasumično odabrana potrošnja uz uvjet da sveukupna potrošnja vode u naselju odgovara prethodno modeliranoj za svaki sat u godini. Međutim, prikazana je velika mogućnost koju softver EPANET pruža za daljnji rad i istraživanje uz relevantnije podatke.



**Slika 35. Prikaz rezultata vodovodne mreže otoka Unije iz EPANET-a**

Simulacijom u EPANET-u dobiju se podatci o potrošnjama pumpe  $P_{pumpe}$ . Tu su sadržane dvije pumpe nove crpne stanice pojedinačne snage 1,5 kW koje dopremaju vodu iz desalinizatora u vodospremu i pumpa iz bunara snage 1,5 kW koja doprema vodu do desalinizatora. Rad pumpi prati rad desalinizatora, što se vidi ljeti kada su one konstantno uključene, Slika 36. Sveukupno, vršna potrošnja pumpi ne prelazi 4,5 kW čime postaje jasno da su ovo jako male potrošnje u odnosu na cijeli sustav koji se sastoji od fotonaponske elektrane i baterije.

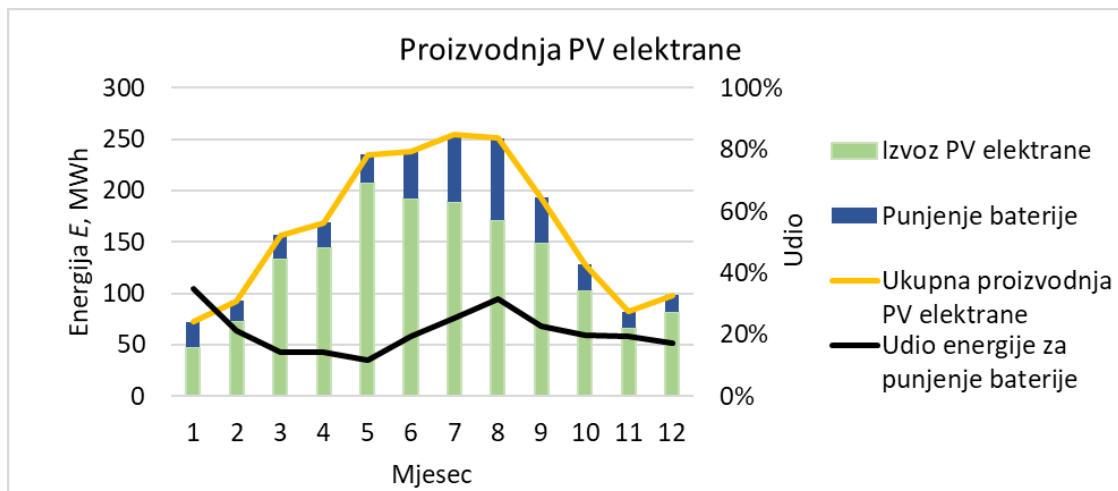


**Slika 36. Dijagram potrošnje pumpi**



## 5.2. Optimizacija u Calliope-u

Proizvodnja PV elektrane 1300 kW za svaki sat je sumirana na razini jednog mjeseca radi preglednosti, Slika 37. Ukupno proizvedena energija iz PV elektrane iznosi 1971 MWh kako je već napomenuto u 4.3.1, dok je energija korištena za punjenje baterije jednaka 411,044 MWh.

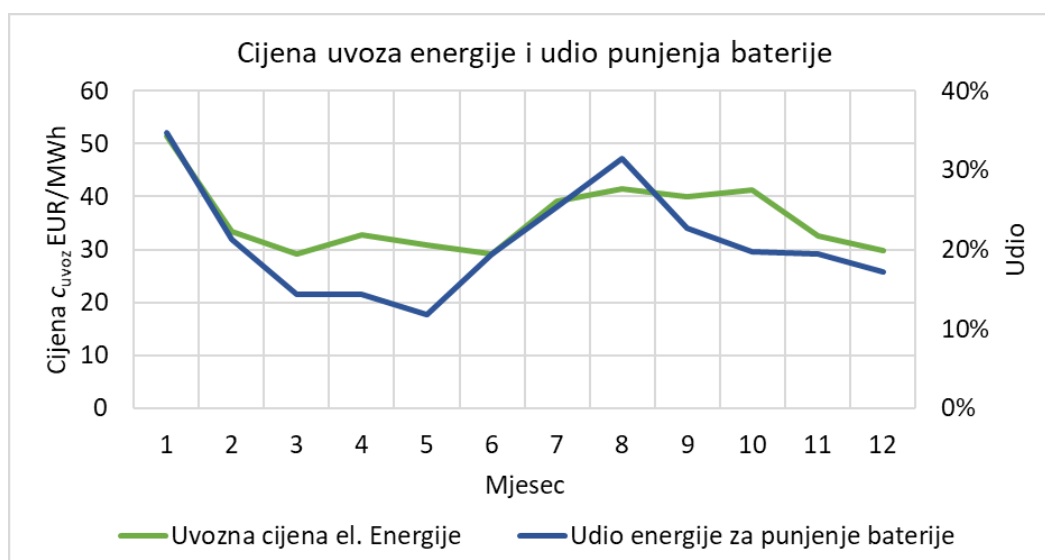


Slika 37. Dijagram proizvodnje PV elektrane s udjelom punjenja baterije

Vidljivo je da udio energije koja se koristi za punjenje baterije i ukupno proizvedene energije varira između minimalne vrijednosti od 12% u svibnju i maksimalne od 31% u kolovozu, dok središnja vrijednost iznosi:

$$\frac{E_{\text{bat}}}{E_{\text{PV1300}}} = \frac{411,044 \text{ MWh}}{1971,720 \text{ MWh}} = 20,8 \%$$

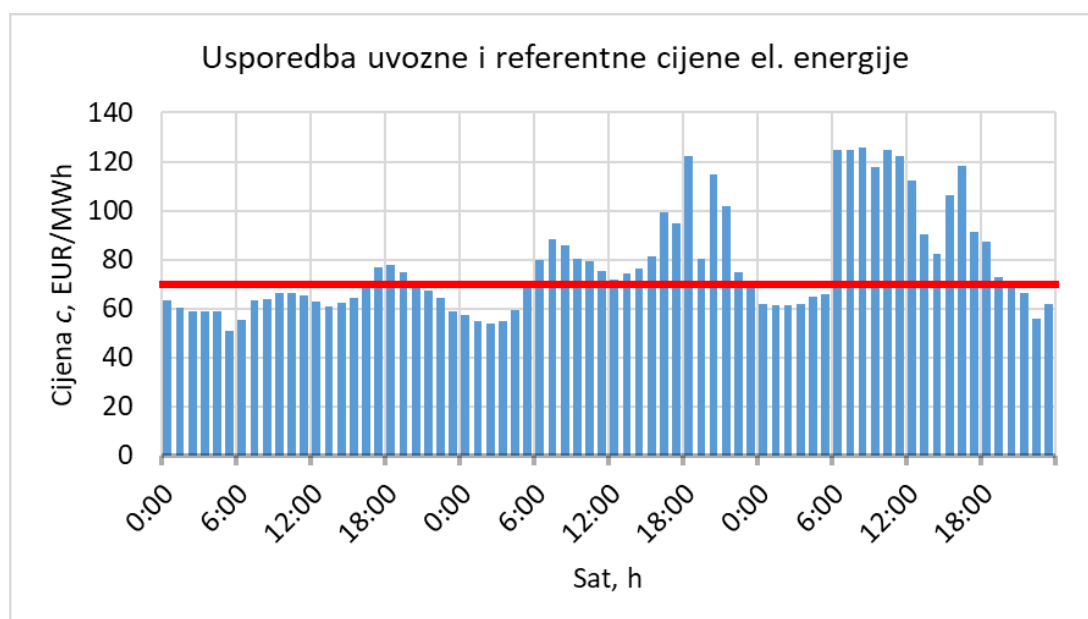
Zanimljivo je prikazati kako se kreće udio energije za punjenje baterije u odnosu na dijagram cijene uvozne električne energije, Slika 38.



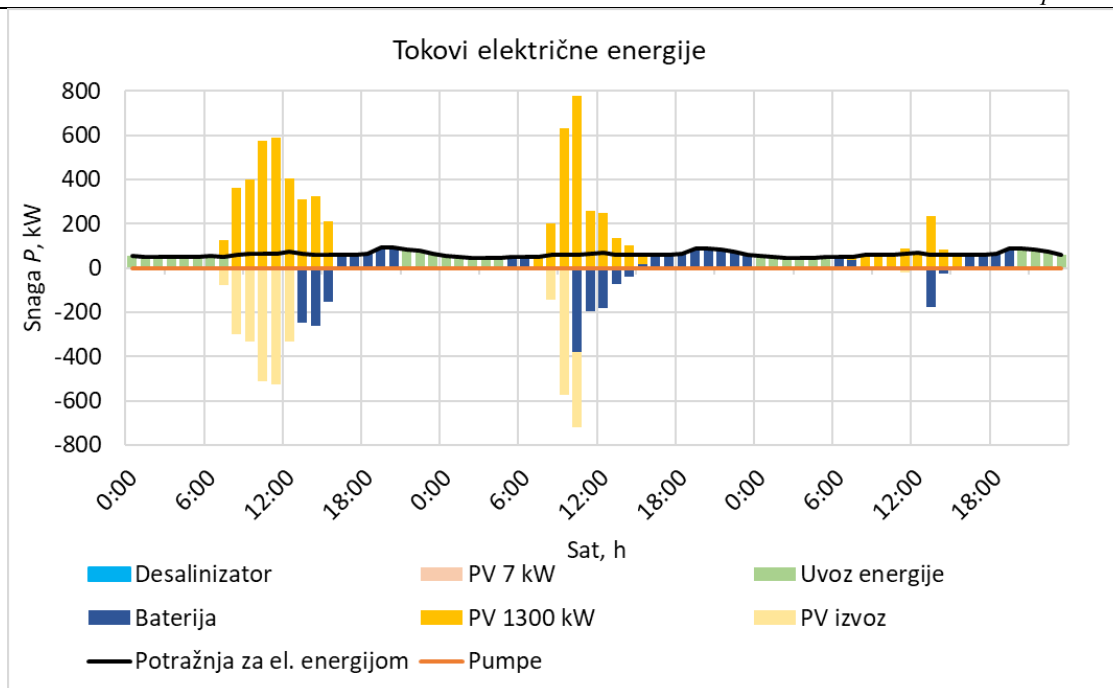
Slika 38. Prikaz odnosa udjela punjenja baterije i uvozne cijene električne energije

Na sljedećim dijagramima se vidi kako model određuje korištenje baterije, odnosno uvoženje električne energije, Slika 39, Slika 40. Potrebno je napomenuti kako se na ovom dijagramu trenutno ne vidi rad PV 7 kW zbog mjerila, isto vrijedi i za rad pumpi, a desalinizator se nije niti koristio. Proizvodnja PV 1300 kW prikazana je na pozitivnoj strani vertikalne osi, dok je izvoz električne energije iz PV 1300 kW prikazan s negativne strane. Gornji dijagram prikazuje kretanje cijene uvozne električne energije za period od 20. do 23. siječnja. Također je crvenom linijom prikazana referentna cijena električne energije RC koja iznosi 70 EUR/MWh. Ako je iznos uvozne električne energije manji od iznosa RC, model odlučuje da će radije koristiti uvoz umjesto baterije za pokrivanje potreba otoka za električnom energijom. Kad bi se koristila baterija, ona bi se morala puniti električnom energijom koju proizvodi PV 1300 kW, što nije isplativo jer je RC viša od uvozne cijene u tom satu pa je isplativije izvoziti tu energiju. U trenutku kad je uvozna cijena električne energije viša od RC, model odabire punjenje baterije proizvedenom električnom energijom čime si smanjuje zaradu od prodaje, ali zato u trenucima kada nema dovoljno insolacije, može zadovoljavati potrebe otoka za električnom energijom iz baterije, umjesto sa skupim uvozom.

Primjerice, prvog dana kad se počinje smanjivati intenzitet proizvodnje električne energije iz PV 1300 kW, ujedno raste i cijena uvozne električne energije iznad RC. U tom trenutku model se odlučuje za punjenje baterije, umjesto za izvoz energije, kako bi tijekom noći mogao koristiti bateriju za zadovoljavanje potreba otoka. Nakon što je cijena uvozne električne energije ponovno pala ispod RC, model se odlučuje za uvoženje električne energije.



Slika 39. Usporedba uvozne i referentne cijene otkupa električne energije



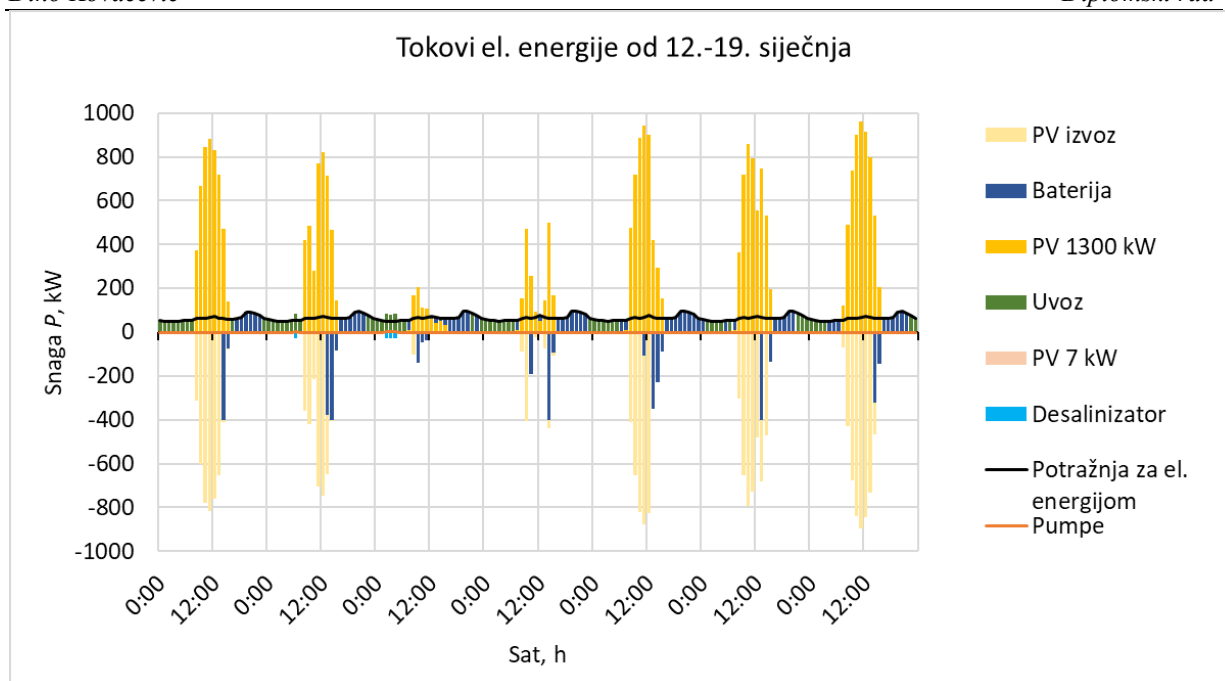
**Slika 40. Dijagram tokova električne energije za tri dana u siječnju**

Prikazani su dijagrami za zimski tjedan u siječnju i ljetni tjedan u kolovozu. Radi nepreglednosti, nisu prikazani dijagrami na godišnjoj razini zbog velike količine podataka (8 varijabli s 8760 vremenskih koraka).

### 5.2.1. Karakterističan zimski tjedan

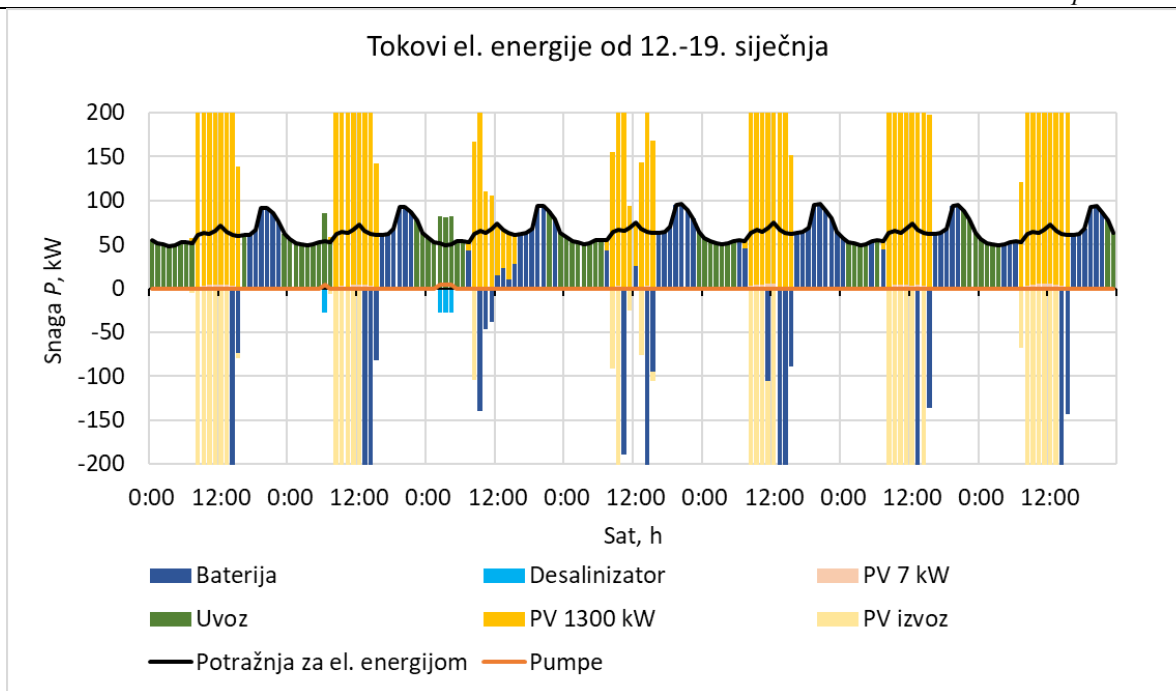
Potrebno je objasniti neke stavke u dijagramu radi lakšeg razumijevanja i čitanja istoga. Varijabla desalinizator predstavlja njegovu potrošnju električne energije te je u dijagramu označen s negativne strane vertikalne osi. Uvoz energije je uvijek pozitivan, dok je izvoz PV elektrane 1300 kW prikazan s negativne strane. Razlika proizvedene energije PV elektrane 1300 kW i njezinog izvoza koristi se za punjenje baterije. Baterija može imati pozitivnu vrijednost kada se prazni, odnosno kada daje energiju u sustav, i negativnu, kada se puni, odnosno kada uzima energiju iz sustava.

Vidljivo je kako tijekom dana dominira proizvodnja PV elektrane 1300 kW, čija se energija troši na punjenje baterije ili izvoz energije, ovisno o cijeni uvozne električne energije u datom trenutku, kao što je već opisano. U noćnim periodima, potrebe otoka za električnom energijom se pokrivaju uvozom energije ili baterijom.



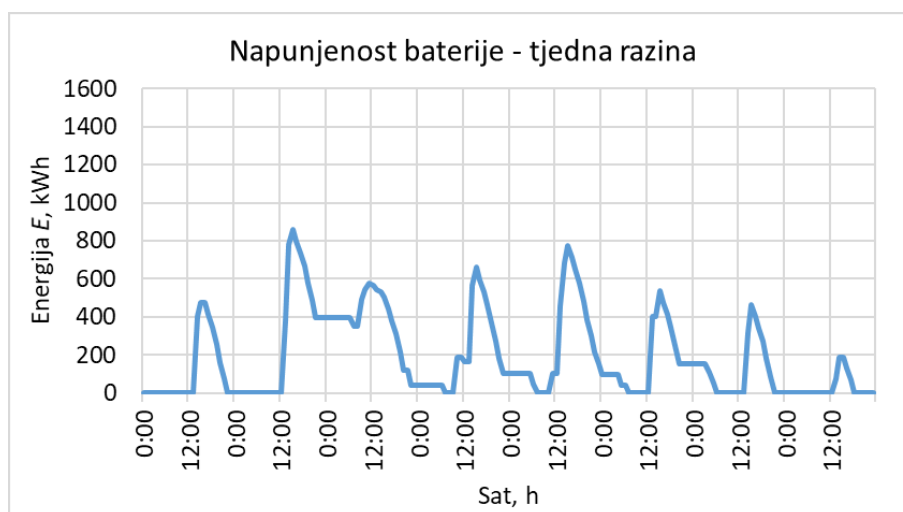
**Slika 41. Dijagram tokova električne energije za karakteristični zimski tjedan u siječnju**

Detaljnije je prikazan dijagram tjedna u siječnju radi pojašnjenja ostalih varijabli koje nisu pregledne u prvom dijagramu zbog velike snage PV elektrane 1300 kW u odnosu na ostatak sustava. Rad pumpi je najbolje vidljiv uz rad desalinizatora, ali s druge strane osi. Razlog tomu je što je model odlučio puniti vodospremu čim se voda pročisti u desalinizatoru. Sveukupno opterećenje koje se dobije od vodovodnog sustava, odnosno desalinizatora i pumpi iznosi nešto više od 30 kW, što je i dalje manje od najmanjeg iznos potražnje otoka za električnom energijom. PV elektrana 7 kW je jedva vidljiva na dijagramu, te se neće dalje spominjati u analizi.



**Slika 42. Detaljniji prikaz dijagrama tokova električne energije za karakteristični zimski tjedan u siječnju**

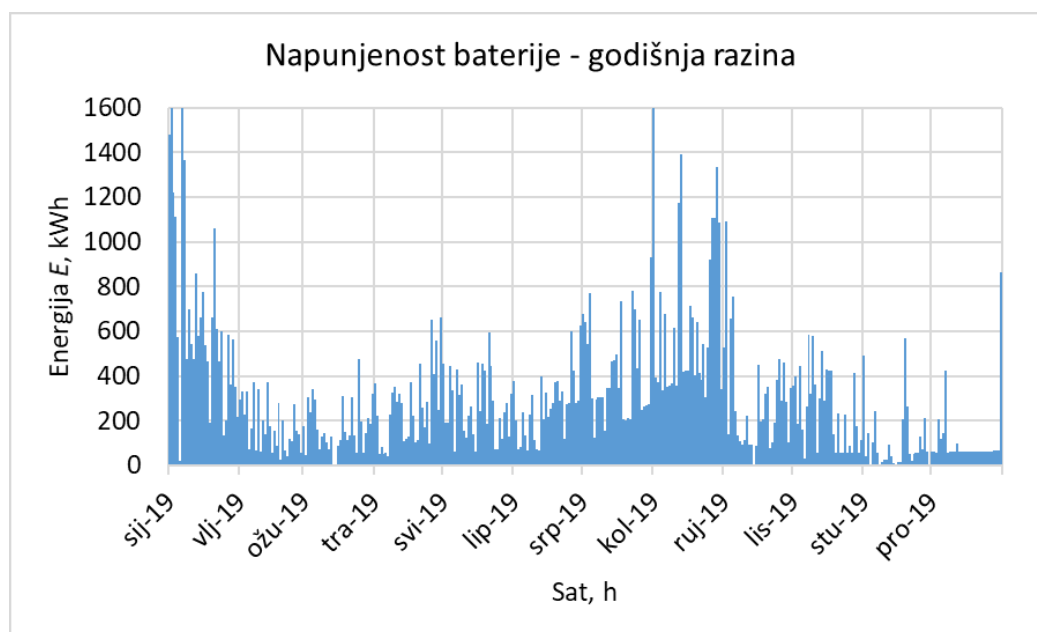
Prikazan je i dijagram napunjenosti baterije za navedeni period, Slika 43. Linijom je označeno stanje napunjenosti baterije u kWh, dok je stupcima prikazano punjenje, odnosno pražnjenje baterije u kW. Potrebno je obratiti pozornost da je na ovom dijagramu obrnuti predznak punjenja/pražnjenja baterije. Vidljivo je da se baterija u tom periodu nije napunila do maksimalnog kapaciteta, već se njezina napunjenost kretala između 0 i 900 kWh.



**Slika 43. Dijagram napunjenosti baterije za karakteristični zimski tjedan u siječnju**

Prigodno je pokazati kretanje razine napunjenosti baterije tijekom cijele godine, Slika 44. Vidljivo je da samo u određenim periodima ta vrijednost dolazi do maksimalne vrijednosti od

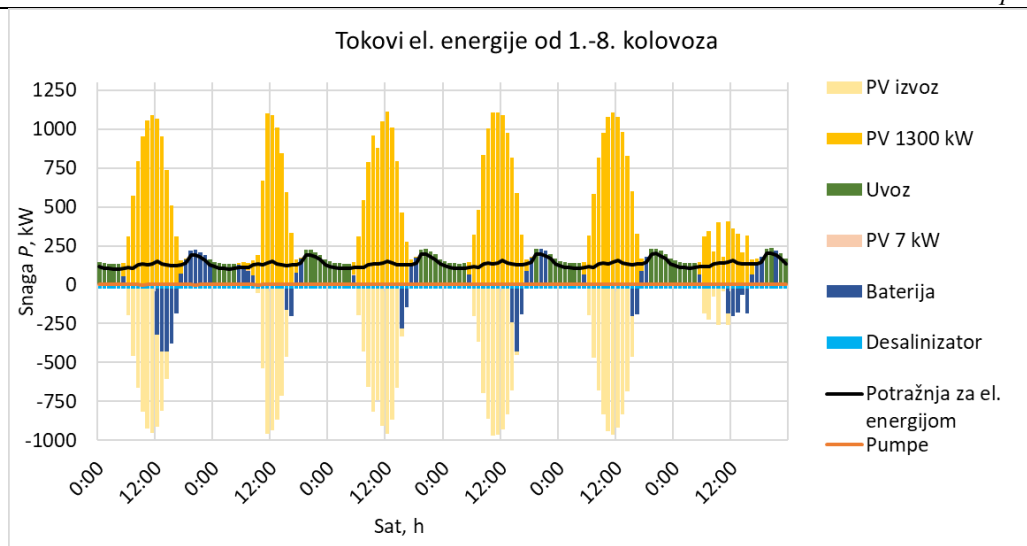
1600 kWh. U siječnju napunjenost ide do maksimalne vrijednosti zbog proizvodnje PV elektrane 1300 kW koja je u nekim danima minimalna. Tijekom ljeta, baterija se iskorištava zbog visoke cijene uvozne električne energije. Kad bi se otok modelirao kao energetska nezavisan, gdje cijena uvozne električne energije ne bi bila bitna, već bi fokus bio na što manjem uvozu električne energije, baterija bi konstantno oscilirala između minimalne i maksimalne razine napunjenosti.



Slika 44. Dijagram napunjenosti baterije tijekom cijele godine

### 5.2.2. Karakterističan ljetni tjedan

Prikazan je dijagram tokova električne energije za karakterističan ljetni tjedan u kolovozu, Slika 45. Vidljivo je odmah, u usporedbi sa zimskim dijagramom da je znatno veća površina koju pokriva proizvodnja PV elektrane 1300 kW, ali isto tako i da većina te energije otpada na izvoz zbog, u tom trenutku povoljne cijene uvoza električne energije. U nekim noćima cijena uvozne energije je ipak visoka, što se direktno vidi iz dijagrama bez potrebe za prikazivanjem dijagrama cijene uvozne energije. Na kraju dana, kada proizvodnja iz PV 1300 kW počinje padati, model bira puniti bateriju kako bi ju mogao iskoristiti u određenim trenucima tijekom noći kad raste cijena uvozne električne energije. Vidljivo je da desalinizator radi tijekom cijelog tjedna zbog povećane potražnje za vodom na otoku usred sezone.



Slika 45. Dijagram tokova električne energije za karakteristični ljetni tjedan u kolovozu

### 5.2.3. Vodovodni sustav

Pri analiziranju vodovodnog sustava, postoji problem nedostatne količine vode koja se javlja tijekom ljeta, Slika 46. Izračunato je da ta vrijednost iznosi  $1291 \text{ m}^3$ . Analizirajući kako desalinizator proizvodi  $80 \text{ m}^3/\text{dan}$ , u okvirnom periodu od dva mjeseca ta količina iznosi:

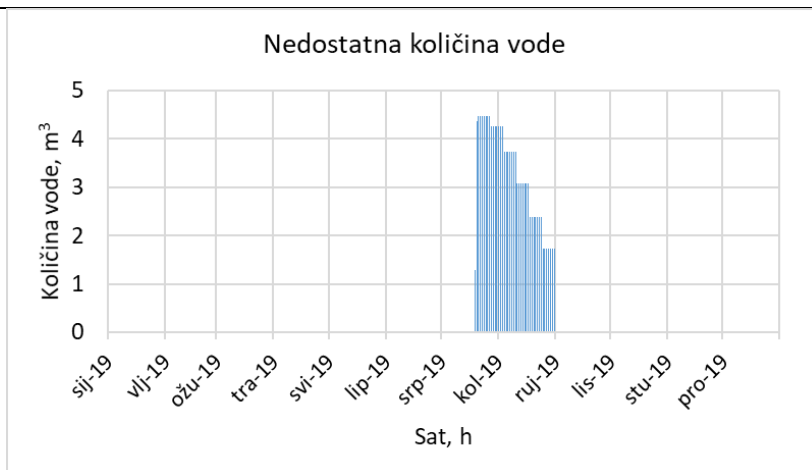
$$80 \frac{\text{m}^3}{\text{dan}} * 62 \text{ dan} = 4960 \text{ m}^3$$

Količina potrebne vode na otoku u periodu od ta dva tjedna iznosi  $6923 \text{ m}^3$ . Uzevši u obzir rezervu vode u vodospremi od  $800 \text{ m}^3$ , ostaje:

$$6923 \text{ m}^3 - 4960 \text{ m}^3 - 800 \text{ m}^3 = 1163 \text{ m}^3$$

Razlika između ručno izračunate količine vode i rezultata u Calliope-u nastaje zbog okvirne procjene perioda od dva mjeseca. Predviđeno je da će se nedostatna količina vode ljeti pokrivati opskrbom iz vodonosca. Ovisno o kapacitetu vodonosca (do  $1000 \text{ m}^3$ ), bit će potrebno minimalno dva puta godišnje opskrbiti otok vodom.

Potražnja za vodom tijekom ljetnih mjeseci je prevelika za ovaj sustav da ju uspije pokriti te će se analizirati rješenja ovog problema u naprednijim scenarijima, Poglavlje 6. Model Calliope-a numerički funkcionira tako da mu nedostatna količina određenog nositelja energije (engl. *carrier*), bilo to električna energija ili voda, predstavlja veliki gubitak kako bi model učinio sve da ne dođe do te pojave. Prema standardnim postavkama, ta vrijednost iznosi  $10^6 \text{ EUR/kW}$ , ili  $\text{EUR/m}^3$ , što nije toliko niti bitno jer se radi o proizvoljno visokoj vrijednosti koja služi da numerički zadovolji uvjet.



Slika 46. Dijagram nedostatne količine vode ljeti

Dijagram napunjenosti spremnika vode prikazan je prethodno u potpoglavlju 5.1, Slika 34. Radi održivosti modela, potrebno je osigurati da je vrijednost napunjenosti spremnika vode i baterije jednaka u početnom i krajnjem vremenskom koraku.

#### 5.2.4. Troškovi

Izračunati su nivelirani troškovi proizvodnje energije (engl. *Levelized Cost of Electricity*) za PV elektrane, bateriju i cjelokupni sustav. PV elektrana od 1300 kW ima nešto manji LCOE od male elektrane PV 7 kW zbog manjih specifičnih investicijskih i troškova održavanja.

Tablica 8. LCOE pojedinih tehnologija u referentnom scenariju

Tehnologija	LCOE [EUR/MWh]
PV 1300 kW	68,28
PV 7 kW	88,13
Baterija	544,55
Cjelokupni sustav	68,30

Prikazani su i izračunati faktori kapaciteta pojedinih tehnologija, Tablica 9. Fotonaponske elektrane rade onim faktorima kapaciteta izračunatima njihovom proizvodnjom u Poglavlju 4.3.1. Baterija u referentnom scenariju radi s niskim faktorom kapaciteta zbog većinskog korištenja uvozne energije.

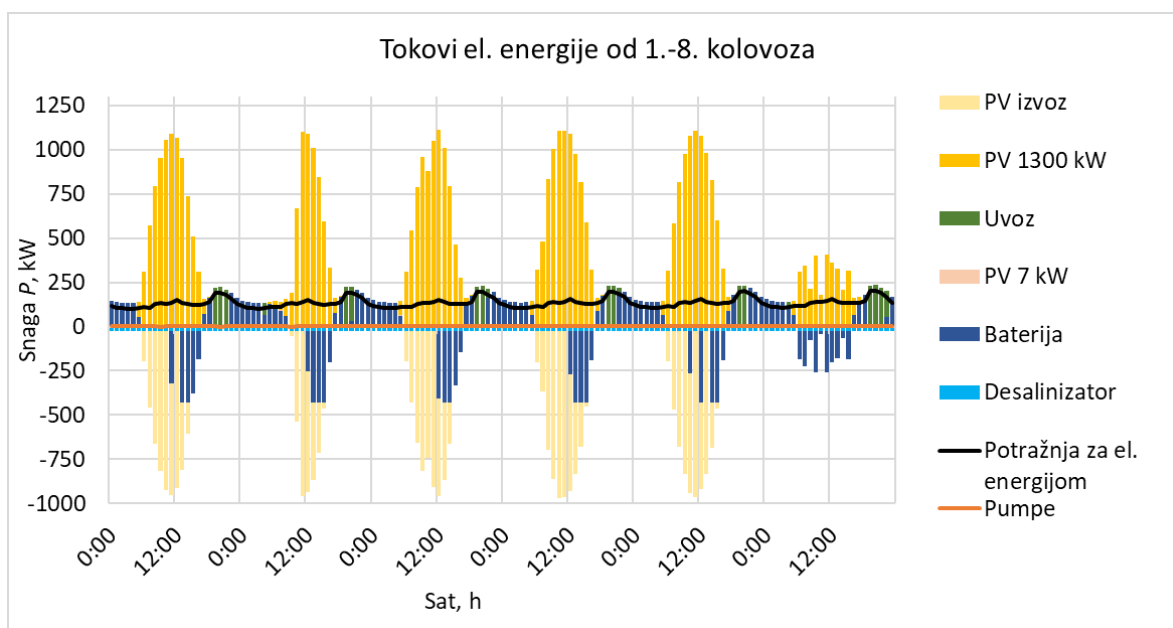


Tablica 9. Faktori kapaciteta pojedinih tehnologija u referentnom scenariju

Tehnologija	Faktori kapaciteta
PV 1300 kW	17,31%
PV 7 kW	17,35%
Baterija	2,96%
Uvoz energije	11,46%
Desalinizator	50,17%

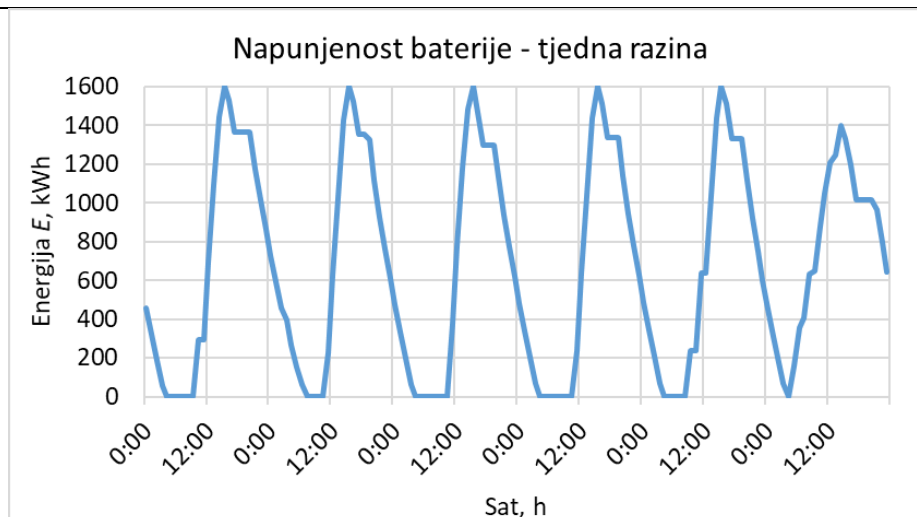
### 5.3. Alternativni referentni scenarij

Prije završetka ovog poglavlja i analize ostalih scenarija, prikazan je alternativni referentni scenarij, uz razliku da je postavljena dovoljno visoka cijena uvozne električne energije. Dovoljno je postaviti cijenu na 71 EUR/MWh, što je više od  $RC=70$  EUR/MWh i model se odlučuje za maksimalno iskorištavanje baterije i uvoženje energije samo onda kada je to nužno, Slika 47. Prikazan je rezultat za ljetni tjedan u kolovozu, identično kao u poglavlju 5.2.2, Slika 45 radi lakše usporedbe.



Slika 47. Dijagram tokova električne energije za karakteristični ljetni tjedan u kolovozu pri alternativnom referentnom scenariju

Kretanje razine napunjenosti baterije u istom tjednu konstantno oscilira između 0 i 1600 kWh, Slika 48. Izračunat je faktor kapaciteta baterije od 12,44% na razini cijele godine.



**Slika 48. Dijagram napunjenosti baterije za karakteristični ljetni tjedan u kolovozu pri alternativnom referentnom scenariju**

Prikazane su razlike u troškovima alternativnog referentnog scenariju u odnosu na referentni scenarij, Tablica 10.. LCOE baterije je pao s 544,55 EUR/MWh na 129,31 EUR/MWh, međutim intenzivnije korištenje baterije podiže ukupni LCOE cijelog sustava sa 68,30 EUR/kWh na 86,06 EUR/kWh.

**Tablica 10. LCOE pojedinih tehnologija u alternativnom referentnom scenariju**

Tehnologija	LCOE [EUR/MWh]
Baterija	129,31
Cjelokupni sustav	86,06

Prikazani su i faktori kapaciteta pojedinih tehnologija koji se razlikuju od referentnog scenarija, Tablica 11. Faktor kapaciteta baterije je narastao s 2,96% na 12,45% što je automatski povezano s padom LCOE-a iste tehnologije. Uvoz energije, zbog rasta faktora kapaciteta baterije, posljedično pada sa 11,46% na 1,29%. Ostale tehnologije rade s istim faktorima kapaciteta kao u referentnom scenariju.

**Tablica 11. Faktori kapaciteta pojedinih tehnologija u alternativnom referentnom scenariju**

Tehnologija	Faktori kapaciteta
Baterija	12,45%
Uvoz energije	1,29%

## 6. SCENARIJI

Osim referentnog scenarija u kojem se modelira planirano stanje EES-a i vodovodnog sustava na otoku Unije, bit će simulirani različiti scenariji kako bi se prikazale mogućnosti nadogradnje referentnog scenarija. U dodatku u prilogu su prikazani samo oni dijelovi koda iz Calliope-a koji se razlikuju od referentnog scenarija.

**Tablica 12. Opis scenarija**

Ime scenarija	Kratica	Opis
Optimizacija baterije	OB	Optimizacija kapaciteta baterije
Optimizacija desalinizatora	OD	Optimizacija kapaciteta desalinizatora u odnosu na postojeće stanje (80 m <sup>3</sup> /dan)
Optimizacija vodospreme	OV	Optimizacija kapaciteta vodospreme u odnosu na postojeće stanje (800 m <sup>3</sup> )
Postojeći spremnici	PS	Spajanje spremnika kod crkve, mjesnog odbora i škole na vodovodnu mrežu
Kućni spremnici	KS	Spajanje kućnih cisterni na vodovodnu mrežu
Ušteda vode	UV	Implementacija metoda uštede vode od 20%
Rekuperacija sive vode	RSV	Rekuperacija sive vode za korištenje u poljoprivredi

Prvi scenarij je vezan za EES, dok su ostali scenariji povezani s vodovodnim sustavom. Ideja ovih scenarija, odnosno nadogradnji na postojeći referentni slučaj je postizanje energetske i vodovodno neovisnog otoka. U slučaju EES-a, to se postiže neovisnošću o uvozu energije povećavanjem kapaciteta baterije, 6.1. U slučaju vodovodnog sustava, potrebno je pokriti potrebe otoka za vodom tijekom vršnih ljetnih mjeseci kako otok ne bi ovisio o opskrbi vode vodonoscem. To se može napraviti nadogradnjom desalinizatora, čime bi se povećao kapacitet proizvodnje pitke vode, 6.2. Također, moguće je analizirati povećanje veličine vodospreme na brdu koja još nije instalirana, 6.3. Umjesto povećavanja kapaciteta vodospreme, predloženo je korištenje postojećih i kućnih spremnika koji se nalaze na otoku, 6.4., 6.5. Analizirana je implementacija metoda uštede vode 6.6. Rekuperacijom sive vode istražuju se dodatne mogućnosti korištenja otpadne vode u svrhu poljoprivrede, 6.7. Za kraj, dana je usporedba scenarija, 6.8.

### 6.1. Optimizacija baterije (OB)

Može se zaključiti kako otok trenutno ovisi o uvozu energije iz nacionalne mreže. Međutim, analizirano je koliki bi bio potrebnii kapacitet baterije da se otok uspije snabdijevati električnom energijom bez potrebe za uvozom. Postavljeni su kapaciteti baterije u Calliope-u kao slobodne varijable, s postavljenom minimalnom vrijednosti koja odgovara planiranoj bateriji (400 kW/1600 kWh). Calliope računa optimalnu veličinu baterije uz zadovoljavanje minimalnih troškova cijelog sustava. Uzeta je pretpostavka da je omjer kapaciteta snage punjenja/pražnjenja i kapacitet pohrane jednak kao i u referentnom slučaju:

$$\frac{P_{\text{bat}}}{E_{\text{bat}}} = \frac{400 \text{ kW}}{1600 \text{ kWh}} = 0,25.$$

Optimizacijom u kojoj je isključena nacionalna mreža, model je izračunao snagu punjenja/pražnjenja baterije 1002 kW, te kapacitet pohrane baterije 4012 kWh. Omjer izračunatih i planiranih kapaciteta baterije iznosi 2,5. Faktor kapaciteta baterije u ovom scenariju iznosi 6,02% što je više od referentnog scenarija, ali manje od referentnog scenarija s visokom cijenom uvozne energije, Tablica 13.

**Tablica 13. Usporedba faktora kapaciteta baterije sličnih scenarija**

Scenarij	Faktor kapaciteta
Referentni scenarij	2,96%
Alternativni referentni scenarij	12,44%
Optimizacija baterije	6,02%

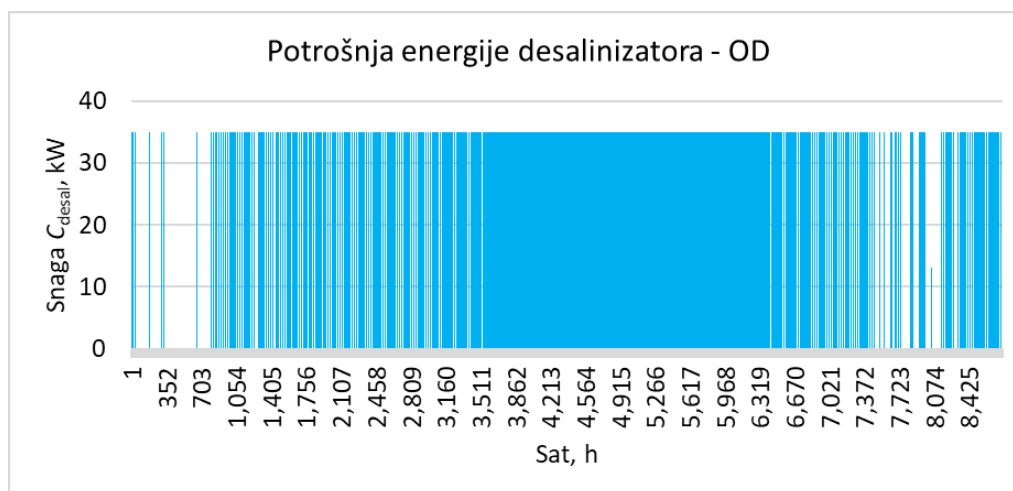
Problem koji nastaje pri analiziranju scenarija optimizacije baterije je proizvodnja PV elektrane u kritičnim mjesecima kao što je siječanj. U tom mjesecu postoje tjedni kada je jako slaba insolacija i model u tom slučaju izračuna da mu treba velika baterija da pokrije taj manjak insolacije. Ostatak godine, baterija radi s manjim kapacitetom, stoga joj je i ukupni faktor kapaciteta manji. Korištenjem relevantnijih podataka koji bi sadržavali točnije mjerenje proizvodnje PV elektrane, moguće je da bi vrijednost potrebne veličine baterije bila manja.

LCOE baterije u OB scenariju iznosi 267,52 EUR/MWh, dok za cijeli sustav iznosi 129,33 EUR/MWh.

Faktori kapaciteta tehnologija u OB scenariju su ostali isti izuzev baterije, Tablica 13.

## 6.2. Optimizacija desalinizatora (OD)

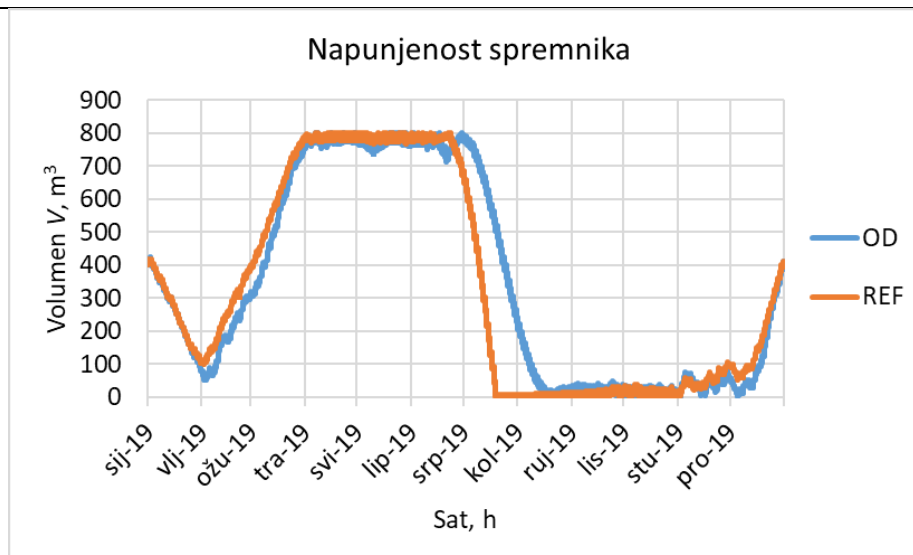
Prva mogućnost nadogradnje vodovodnog sustava je nadogradnja desalinizatora. Ovaj pothvat je u planu prema ViOCL-a ako bude potrebe za dodatnim kapacitetima vode. Novi desalinizator bi u tom slučaju uzimao morsku vodu umjesto bočate. Vezano za reverznu osmozu, morsku vodu je teže desalinizirati zbog veće količine soli pa je iz tog aspekta potrošnja energije veća. Međutim, postoje brojni faktori koji utječu na ukupnu potrošnju sustava ovisno koja voda se koristi. Bočata voda se najčešće crpi iz bunara na negativnoj nadmorskoj visini što zahtijeva veće kapacitete pumpi. Temperatura bočate vode može biti manja od temperature morske vode što predstavlja dodatan energetski trošak [63]. Zbog navedenih razloga, nije analizirana potrošnja desalinizatora koji crpi morsku vodu već je samo optimizirana njegova veličina, odnosno ukupni protok, Slika 49. Slično kao i s baterijom, u Calliope-u se ovaj scenarij modelira postavljanjem minimalne vrijednosti protoka vode koju pročišćava.



Slika 49. Dijagram potrošnje električne energije desalinizatora u OD scenariju

S obzirom na postavljeni kapacitet protoka od  $3.333 \text{ m}^3/\text{h}$  u referentnom scenariju, model je izračunao novi potrebiti protok od  $4.212 \text{ m}^3/\text{h}$  što je povećanje od 26% u odnosu na trenutni desalinizator. Ta vrijednost odgovara snazi desalinizatora od 34,88 kW.

Prikazana je usporedba napunjenosti spremnika u odnosu na referentni scenarij, Slika 50. Može se primijetiti kako su grafovi jako slični izuzev perioda kada kreće pražnjenje spremnika. U tom periodu, spremnik se u referentnom scenariju znatno prije prazni zbog manjeg priljeva vode iz desalinizatora.



Slika 50. Dijagram usporedbe razine napunjenosti spremnika OD i REF scenarija

Jedina promjena troškova odnosi se na bateriju. Troškovi desalinizatora nisu analizirani u Calliope-u. LCOE baterije u OD scenariju iznosi 527,84 EUR/MWh, a cijelog sustava 75,19 EUR/MWh.

Faktor kapaciteta baterije iznosi 3,05%, nacionalne mreže 11,73%, a desalinizatora 43,20%. Može se primijetiti kako desalinizator radi s manjim faktorom kapaciteta u ovom scenariju u odnosu na referentni. Razlog je u tome što je desalinizator u referentnom scenariju optimalno projektiran za osrednjeno opterećenje tijekom godine, a problem mu stvara ljetno vršno opterećenje. Kad se desalinizator optimizira, odnosno dimenzionira prema vršnom opterećenju, opada njegov faktor kapaciteta.

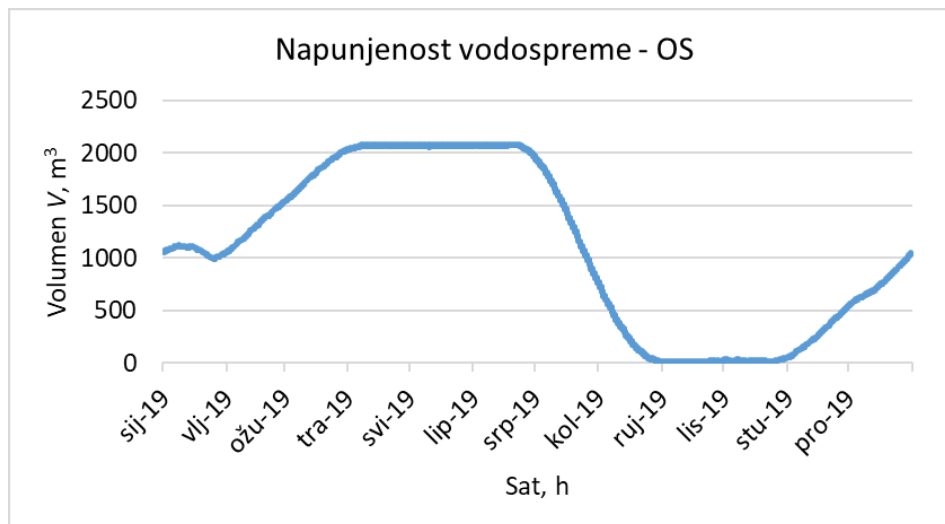
### 6.3. Optimizacija vodospreme (OV)

Optimizacija spremnika služi za prikazivanje koliko bi velik trebao biti planirani spremnik na brdu kako bi se uspješno pokrile potrebe otoka za vodom. Izračunato je da ta vrijednost iznosi 2099 m<sup>3</sup>, Slika 51. U tom slučaju ne bi bilo nedostataka vode ljeti te bi se pokrile sve potrebe otoka za vodom. Oduzimajući novo izračunati volumen spremnika s postojećim volumenom:

$$2099 \text{ m}^3 - 800 \text{ m}^3 = 1299 \text{ m}^3,$$

dobije se nedostatna količina vode izračunata u Poglavlju 5.2.3, Slika 46. Analizirajući dijagram, može se primijetiti kako se vodosprema u prva četiri mjeseca godine napuni od polovice napunjenosti do maksimalne razine. Ovisno o stanju u EES-u, prvenstveno cijenama uvoza i niskoj tarifi električne energije, desalinizator radi kako bi napunio spremnik. Tijekom ljeta, počevši u srpnju, opterećenje otoka je najveće te se spremnik naglo počinje prazniti uz konstantan rad desalinizatora. Nakon kraja vršnog opterećenja godine, koje traje do početka

rujna, spremnik se održava na minimalnoj razini. Krajem godine, kada je minimalno opterećenje na vodovodni i energetska sustav, vodosprema se ponovno počinje puniti do polovice razine napunjenosti. Kako je već spomenuto, razina napunjenosti mora biti jednaka na početku i na kraju godine radi osiguravanja održivosti sustava narednih godina.



**Slika 51. Dijagram napunjenosti spremnika vode u OS scenariju**

Pri analizi ovog scenarija, postavljena je proizvoljno velika investicijska cijena vodospreme kako bi se model odlučio za kapacitet spremnika koji mu je potreban. Kada se ne bi uzeli u obzir investicijski troškovi, model bi izgradio još veći spremnik kako bi mogao još bolje optimizirati troškova i rad desalinizatora. Iz tog razloga, nisu analizirani troškovi cjelokupnog sustava, već samo LCOE baterije, koji iznosi 544,93 EUR/MWh i faktori kapaciteta. Izuzev desalinizatora, čiji faktor kapaciteta iznosi 54,59%, svi faktori odgovaraju vrijednostima iz referentnog scenarija

Razlika iznosa faktora kapaciteta u ovome i referentnom scenariju:

$$54,59 - 50,17 = 4,42\%$$

pomnožena s maksimalnom količinom vode koju desalinizator može proizvesti:

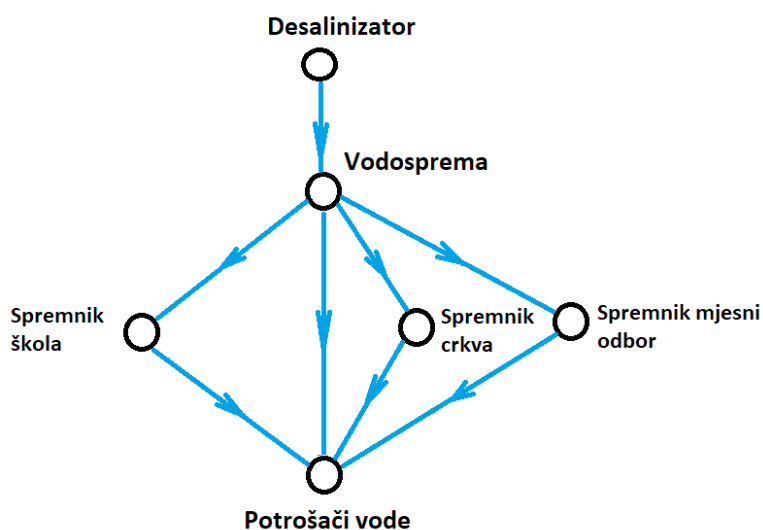
$$0.0442 * 80 \frac{\text{m}^3}{\text{dan}} * 365 \text{ dana} = 1290,64 \text{ m}^3,$$

odgovara vrijednosti nedostatne količine vode izračunate u referentnom scenariju.

#### 6.4. Postojeći spremnici (PS)

S obzirom na nedostajuću količinu vode od 1291 m<sup>3</sup>, izračunatu u Poglavlju 5.2.3, potrebno je razmotriti mogućnost korištenja postojećih javnih cisterni kod škole (350 m<sup>3</sup>), crkve (350 m<sup>3</sup>) i mjesnog odbora (850 m<sup>3</sup>). Spremnici su uključeni u model prema shemi, Slika 52. Voda iz

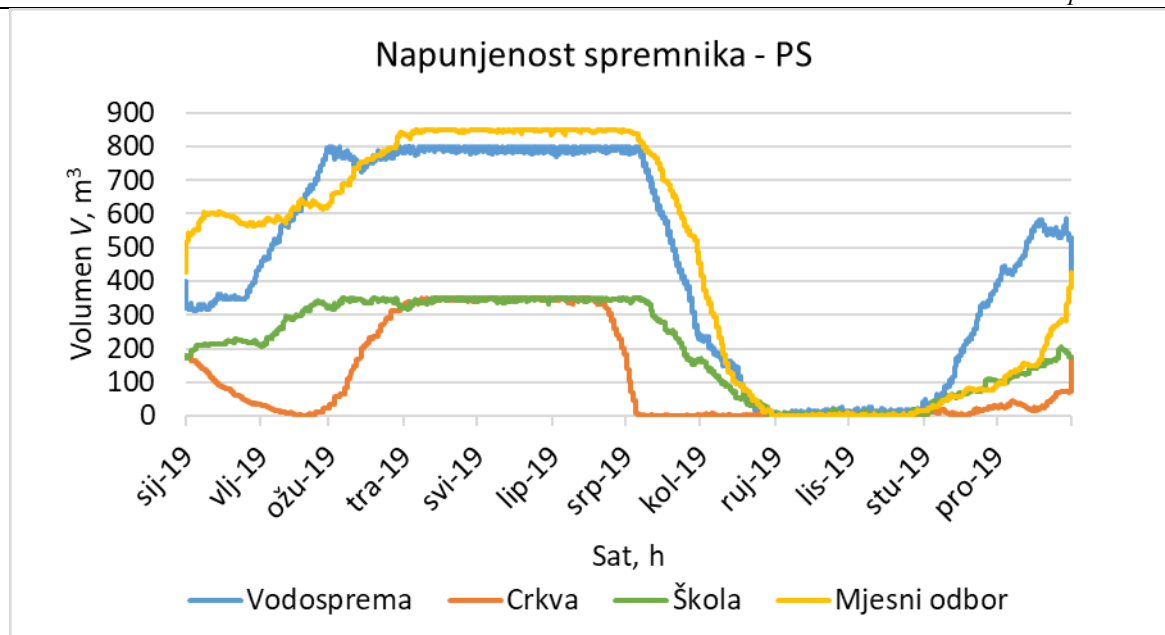
desalinizatora puni vodospremu koja distribuira vodu po naselju, potrošačima ili u spremnike. Spremnici dakle prikupljaju vodu iz vodospreme, a prazne se u mrežu prema potrošačima. Ovaj pristup je analiziran u radu te nije detaljno proučen pošto se planira da se postojeći spremnici više neće koristiti. Bitno je napomenuti da za Calliope model nije bitno na koji način će se ovi spremnici spojiti, već to većinom utječe na trajanje optimizacije i numeriku. Iz tog razloga nije analizirana alternativa spajanja svih spremnika s desalinizatorom.



**Slika 52. Shema povezanosti spremnika u Calliope modelu u PS scenariju**

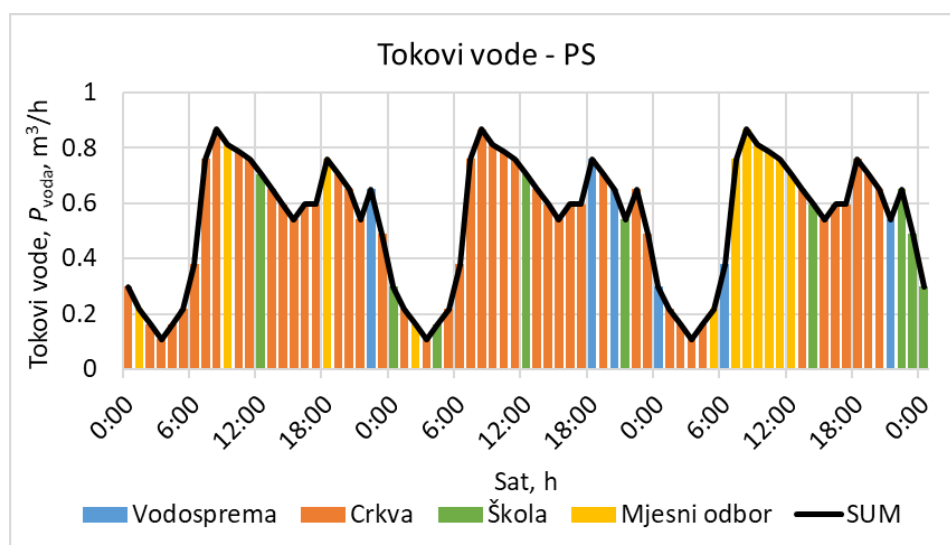
Ukupni volumen novih korištenih spremnika iznosi 1550 m<sup>3</sup> što je dovoljno da pokrije vršno ljetno opterećenje bez potrebe za korištenjem vodonosca, Slika 53. Slično kao u referentnom, Slika 34 i OS scenariju, Slika 51, spremnici se pune vodom iz desalinizatora tijekom prva četiri mjeseca godine, ovisno o stanju EES-a. Sredinom lipnja počinje pražnjenje spremnika kod crkve, a zatim i ostalih spremnika. Početkom rujna, svi spremnici su ispražnjeni i potrebe za vodom se zadovoljavaju radom desalinizatora. U tom periodu, nema akumulacije vode u spremnicima. Krajem godine, zbog uvjeta održivosti modela, spremnici se ponovno pune na početnu vrijednost.





Slika 53. Dijagram napunjenosti spremnika u PS scenariju

Prikazan je i dijagram tokova vode iz spremnika u PS scenariju za prva tri dana u godini, Slika 54.



Slika 54. Dijagram tokova vode iz spremnika u prva tri dana godine u PS scenariju

Svi troškovi vezani za EES kod ovog scenarija su identični referentnom scenariju. Isto vrijedi i za faktore kapaciteta, osim faktora kapaciteta desalinizatora koji iznosi 54,59%, što je nešto više od referentnog scenarija gdje je 50,17%.

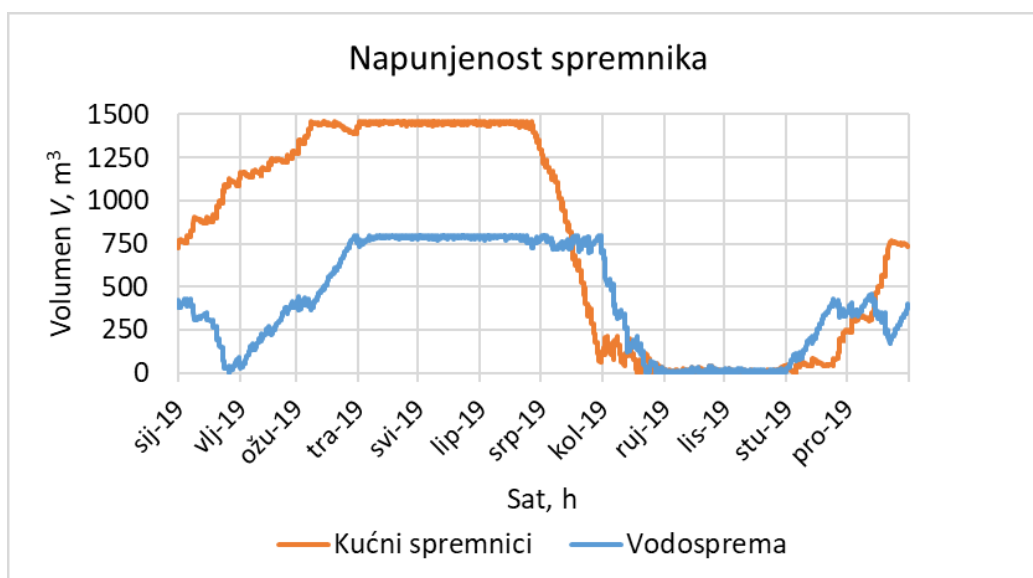
### 6.5. Kućni spremnici (KS)

S obzirom na veliku količinu spremnika u stambenim objektima, analizirat će se njihovo korištenje u vodovodnom sustavu. Spremnici se mogu koristiti za prikupljanje kišnice i daljnje korištenje za navodnjavanje. Međutim, zbog nedostatka vode ljeti, analizirano je korištenje spremnika koji služe za akumulaciju vode u kućanstvu, a spojeni su na vodovodnu mrežu.

U poglavlju 1.3 je ustanovljeno da se na otoku nalaze 292 stambena objekta, od kojih većina objekata koristi vlastite gusterne za opskrbu vodom. Međutim, ne postoji podatak o točnom broju niti volumenu tih gusterni, stoga je potrebno uzeti u obzir određene pretpostavke. Prema nedavno objavljenoj studiji vezanoj za otok Silbu, volumeni vlastitih gusterni na otoku se kreću između  $20 \text{ m}^3$  i  $70 \text{ m}^3$  [64]. Uz pretpostavku da četvrtina objekata (73) koristi gusterne veličine  $20 \text{ m}^3$ , dobije se vodena rezerva od:

$$73 * 20 \text{ m}^3 = 1460 \text{ m}^3,$$

što je dovoljna rezerva da pokrije vršno ljetno opterećenje, Slika 55. Treba uzeti u obzir da je ova rezerva potrebna samo u kritičnom periodu godine, stoga ne predstavlja problem što se svih 73 spremnika neće koristiti tijekom cijele godine. Vezano za model Calliope-a, kućni spremnici su modelirani kao jedan spremnik kapaciteta  $1460 \text{ m}^3$ , te su korišteni kao tehnologija pohrane vode na lokaciji „Unije“. Pune se vodom iz vodospreme te se prazne potrošnjom vode potrošača na Unijama.



Slika 55. Dijagram napunjenosti spremnika u KS scenariju

Početkom godine, model odlučuje puniti kućne spremnike prazneći vodospremu, a zatim nastavlja s punjenjem vodospreme. Do početka travnja, oba spremnika su napunjena do maksimalnog kapaciteta. Krajem lipnja počinje pražnjenje kućnih spremnika, dok se

vodosprema počinje prazniti tek početkom kolovoza. Krajem godine spremnici se ponovno pune na polovinu kapaciteta.

LCOE baterije iznosi 329,99 EUR/MWh, a cijelog sustava 68,43 EUR/MWh. Faktor kapaciteta baterije iznosi 4,88%, uvozne energije 11,80%, a desalinizatora 54,59%.

### 6.6. Ušteda vode (UV)

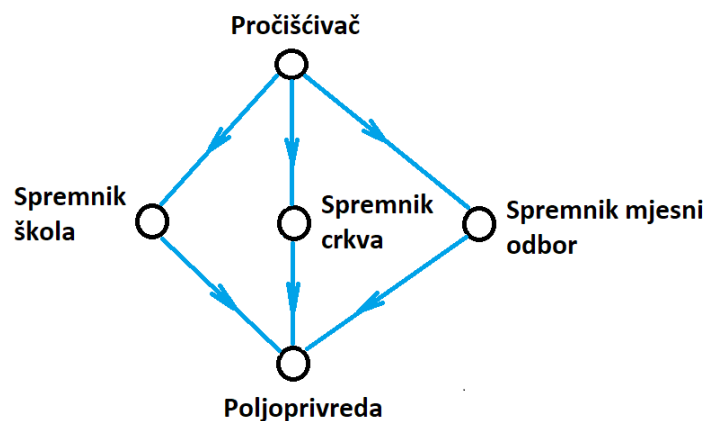
Metodama uštede vode, koje su prethodno spomenute u Poglavlju 2.2, može se riješiti problem nedostatka vode na otoku. Ugradnjom perlatora, efikasnijih mlaznica tuša, vodokotlića, perilica za rublje i suđe, te primjenom efikasnijeg sustava navodnjavanja mogu se ostvariti znatne uštede vode na cijelom otoku. Najbitniji je ljudski faktor, stoga je bitno brendiranje otoka kao održivog i energetski i vodno nezavisnog od kopna. Time se privlače turisti kod kojih je razvijena svijest o klimatskim promjenama i važnosti uštede energije i vode. Detaljnim mjerenjima i praćenjem podataka u stvarnom vremenu, pratit će se potrošnja voda pa se vrlo lako mogu detektirati kvarovi ili curenja vode što dovodi do velikih gubitaka kad nije primijećeno na vrijeme.

Analiziran je scenarij s uštedom vode od 20% pri kojemu nema nedostatne količine vode, odnosno potrebe za opskrbom vodonoscem.

LCOE baterije ovog scenarija gotovo je isti kao i referentni scenarij uz zanemarive numeričke razlike. Isto vrijedi i za faktore kapaciteta koji su isti izuzev desalinizatora koji iznosi 43,67% u odnosu na 50,17%. Razlog tomu je manja potreba za proizvodnjom vode zbog smanjenja potrošnje vode na otoku.

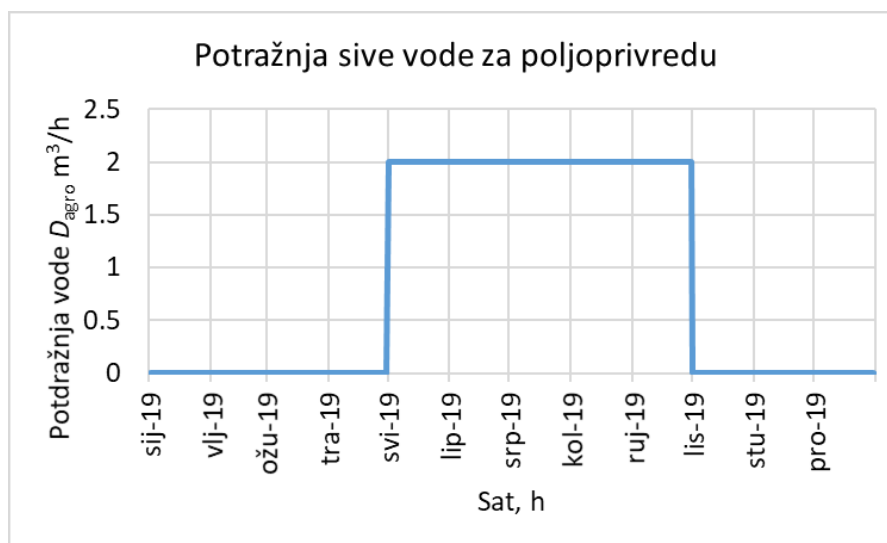
### 6.7. Rekuperacija sive vode (RSV)

Velika količina vode u kućanstvima se koristi za aktivnosti koje ju ne zagađuju značajno već nastaje tzv. siva voda. Analiziran je scenarij u kojem se u svakom kućanstvu odvaja siva voda te se kolektivno skuplja u pročišćivaču sive vode. Ovaj scenarij podrazumijeva korištenje dodatnih cijevi u kanalizacijskom sustavu, koji je položen zajedno s vodovodnim, što znači da trenutno nije izvediv. Međutim, prikazan je kao pokazni scenarij zbog mogućnosti korištenja sive vode u svrhu ratarstva ili stočarstva. S obzirom na to da je promatran alternativni scenarij, nije se detaljno istraživala problematika poljoprivrede, padalina i potrebnih količina vode. Stvorene su dvije nove lokacije u Calliope-u, pročišćivač i poljoprivreda, Slika 56. U ovom scenariju su korišteni postojeći spremnici kod škole (350 m<sup>3</sup>), crkve (350 m<sup>3</sup>) i mjesnog odbora (850 m<sup>3</sup>), koji služe za akumulaciju vode tijekom prvog dijela godine.



Slika 56. Shema povezanosti spremnika u Calliope-u u RSV scenariju

Pročišćivač je modeliran kao izvor vode s dijagramom proizvodnje sive vode koji odgovara iznosu od 50% potražnje, odnosno potrošene vode u naselju. Poljoprivreda je modelirana kao tehnologija potražnje na način da se u periodu od svibnja do listopada konstantno snabdijeva vodom jednakom količinom, Slika 57. Pretpostavljeno je da je to sušni period u kojemu treba veća količina vode. Detaljnija analiza bi zahtijevala dodatno istraživanje poljoprivredne tematike.



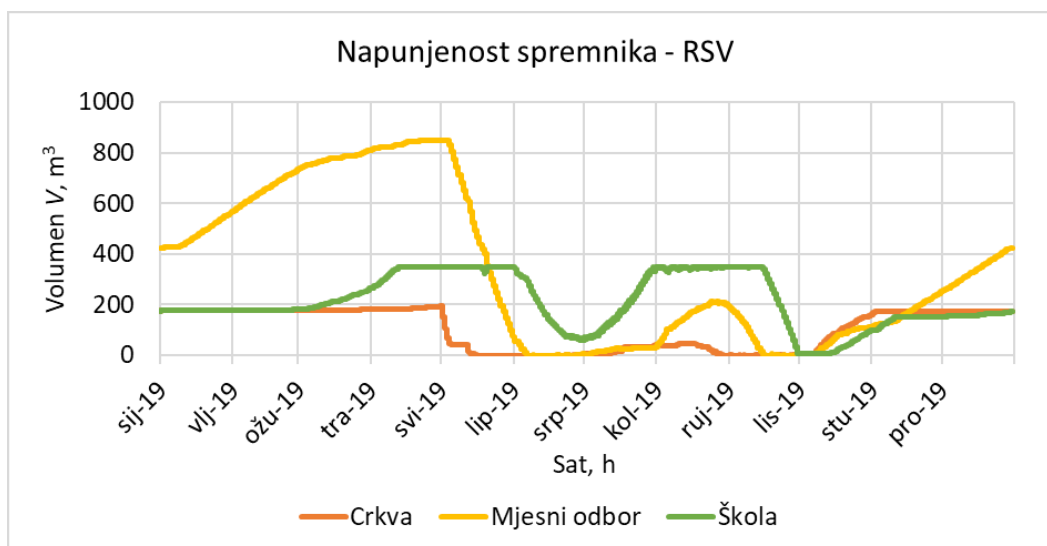
Slika 57. Dijagram potražnje za sivom vodom za poljoprivredu u RSV scenariju

Izračunato je da je moguće koristiti  $2 m^3/h$  tijekom 5 mjeseci. Također je izračunato je da se tijekom godine proizvede  $7967 m^3$  sive vode, dok potražnja za sivom vodom s pretpostavkom konstantnog protoka od  $2 m^3/h$  iznosi  $7344 m^3$ . S obzirom na malu razliku između te dvije vrijednosti:

$$7967 m^3 - 7344 m^3 = 623 m^3,$$

jasno je da postoji velika potreba za akumulacijom vode tijekom godine. Stoga su korištene sve postojeće cisterne. Dodatni scenarij koji bi se mogao analizirati je izgradnja novog spremnika samo u svrhe poljoprivrede.

Spremnici se pune u prvom dijelu godine koliko je to moguće zbog manje količine otpadne sive vode. U svibnju kreće opterećenje poljoprivrede pa se spremnici kod crkve i mjesnog odbora prazne, a nakon njih kreće i pražnjenje spremnika kod škole. U lipnju kreće nešto veća potrošnja vode na otoku, a time i količina sive vode pa se spremnici uspijevaju puniti. Potrebno je napomenuti da je dnevna proizvodnja sive vode tijekom srpnja i kolovoza veća od opterećenja poljoprivrede pa su to ustvari povoljni mjeseci jer se spremnici uspijevaju puniti. Najkritičniji su svibanj i listopad kada je manja proizvodnja sive vode. Stoga nakon djelomičnog punjenja spremnika tijekom vršnog opterećenja, slijedi pražnjenje u listopadu. Ostatak godine, spremnici se ponovno pune na početnu razinu, Slika 58.



**Slika 58. Dijagram napunjenosti spremnika u RSV scenariju**

Potrebno je napomenuti da ovaj scenarij ne rješava problem nedostatne količine vode, već samo istražuje mogućnosti korištenja sive vode u svrhe poljoprivrede.

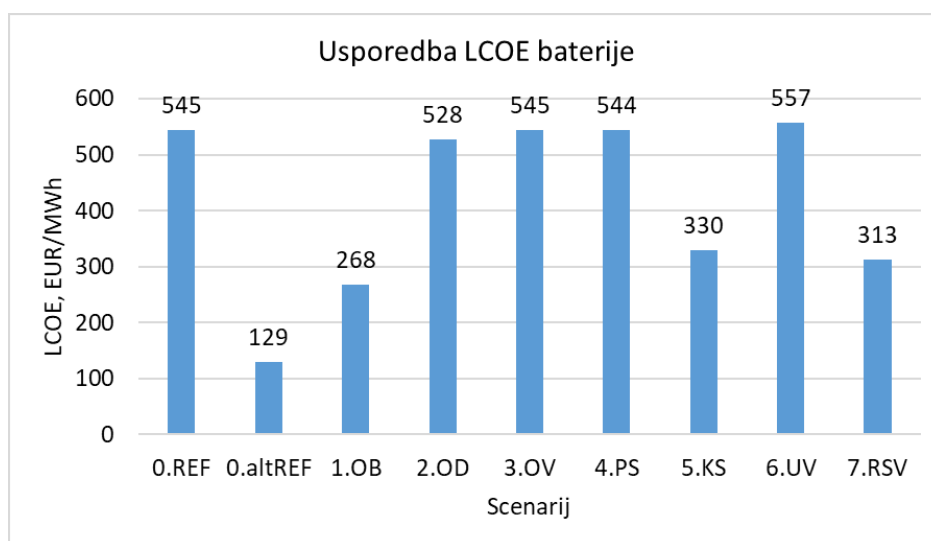
LCOE baterije u ovom scenariju je 312,79 EUR/MWh, a cijelog sustava 68,32 EUR/MWh, isto kao u referentnom scenariju.

Faktori kapaciteta desalinizatora i uvozne energije su jednaki referentnom scenariju, dok je faktor kapaciteta baterije jednak 5,15%

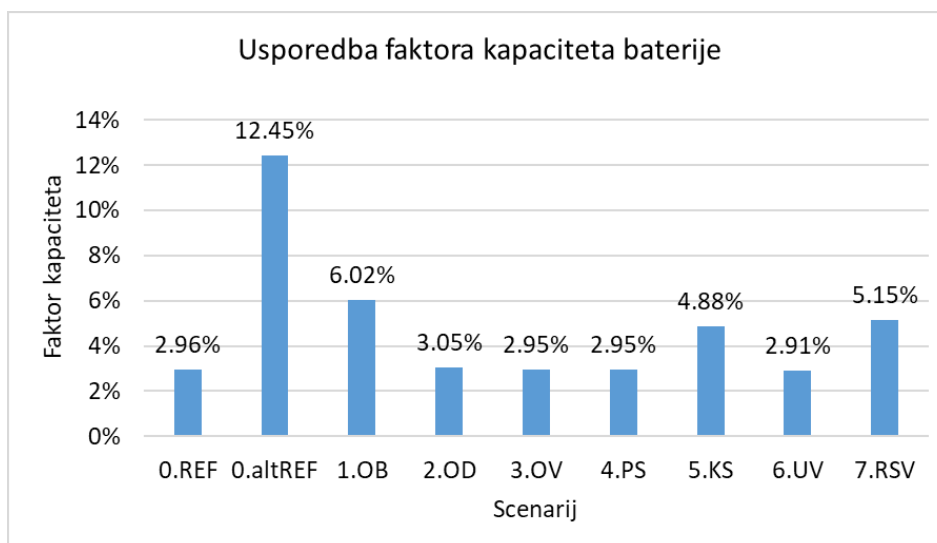
## 6.8. Usporedba scenarija

Za kraj, dana je usporedba svih scenarija navedenih u ovom poglavlju uključujući referentni i alternativni referentni scenarij. Scenariji su uspoređeni prema LCOE i faktorima kapaciteta. Kao što je već spomenuto u potpoglavlju 6.3, OV scenarij nije analiziran po pitanju ukupnih troškova jer je bilo potrebno postaviti proizvoljno visoku investicijsku cijenu vodospreme.

Različite vrijednosti LCOE baterije inverzno su vezane za faktore kapaciteta baterija, Slika 59, Slika 60. Alternativni referentni scenarij ima najmanji LCOE baterije iz razloga što je tamo najveći faktor kapaciteta pa je samim time i baterija najviše iskorištena u odnosu na druge scenarije.

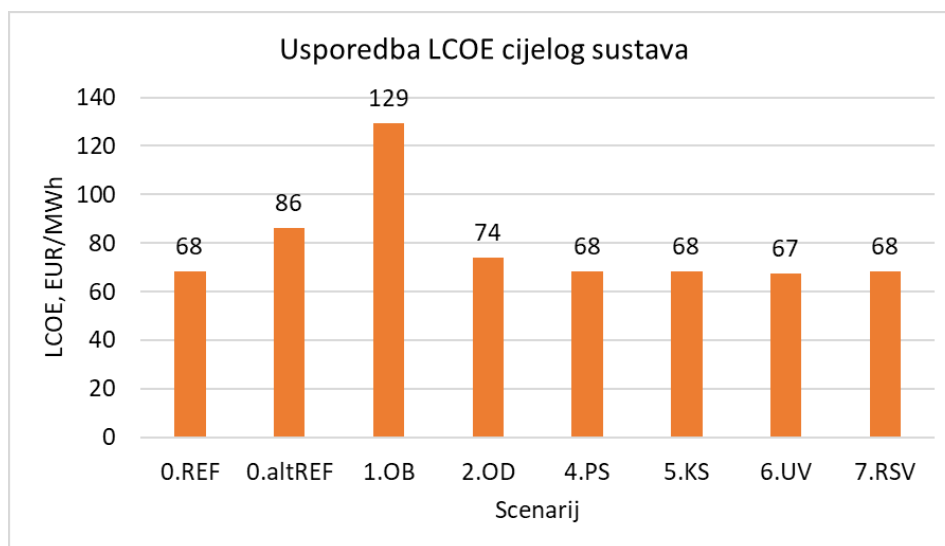


Slika 59. Usporedba LCOE baterije različitih scenarija



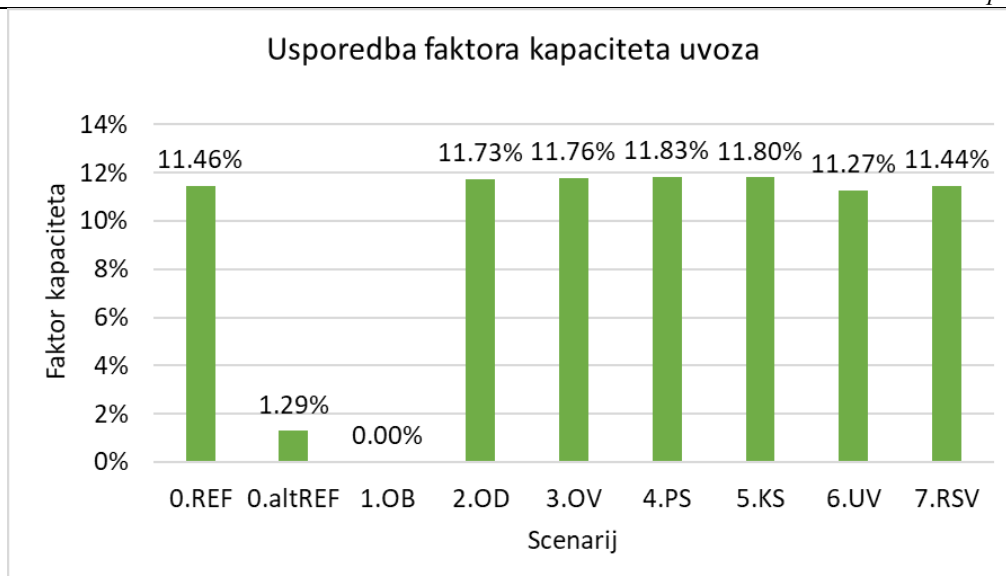
Slika 60. Usporedba faktora kapaciteta baterije različitih scenarija

LCOE sustava se može uspoređivati za prva četiri scenarija s dijagrama pošto se u njima nalaze relevantne investicijske cijene tehnologija. Druga četiri scenarija su vezana za promjene na vodovodnom sustavu u kojem nisu dane investicijske cijene. Izuzetak je OD scenarij koji pripada vodovodnom scenariju, ali su dane investicijske cijene desalinizatora, navedene u poglavlju 4.3.4. U odnosu na referentni scenarij, LCOE alternativnog referentnog scenarija je viši za 26% zbog namjerno postavljene više cijene uvozne energije. Time se model odlučuje za punjenje baterije u trenutcima kada bi mogao prodavati električnu energiju po referentnoj cijeni i tako gubi na zaradi sustava. OB scenarij ima daleko najveći LCOE zato što je kapacitet baterije 2,5 puta veći od referentnog i to predstavlja investicijski trošak na cijeli sustav. Izuzev investicije, u ovom scenariju uopće nema uvoza energije pa je još intenzivnije gubitak na zaradi nego u alternativnom referentnom scenariju, Slika 61.



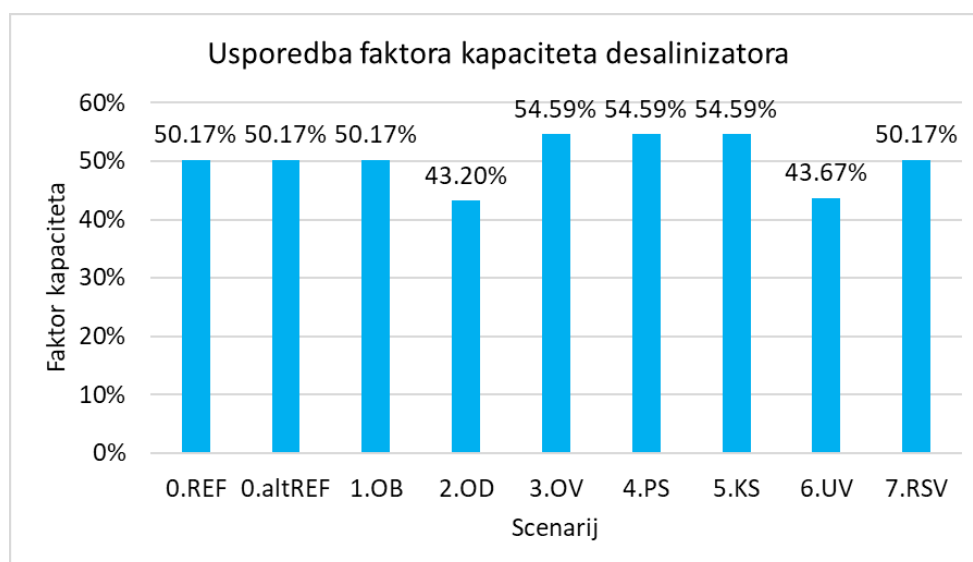
**Slika 61. Usporedba LCOE cijelog sustava različitih scenarija**

Faktori kapaciteta uvoza su više-manje jednaki u svim scenarijima izuzev alternativnog referentnog i OB scenarija zbog same prirode postavljanja tih scenarija, Slika 62.



**Slika 62. Usporedba faktora kapaciteta uvozne tehnologije različitih scenarija**

Faktori kapaciteta desalinizatora su isti u prva tri scenarija vezana za EES, kao i u RSV scenariju, Slika 63. Nešto su manji u OD scenariju zbog manjeg iskorištavanja kapaciteta većeg desalinizatora i UV scenariju zbog i u UV scenariju zbog smanjene potrebe za proizvodnjom vode. S druge strane, OV, PS i KS scenariji zahtijevaju dodatnu proizvodnju vode iz desalinizatora da riješe problem nedostatne količine vode, što rezultira većim faktorom kapaciteta.



**Slika 63. Usporedba faktora kapaciteta desalinizatora različitih scenarija**



## 7. ZAKLJUČAK

Zadatak rada bio je analizirati sponu vodovodnog i energetskeg sustava na otoku Unije. Vodovodni sustav se sastoji od izgrađenog desalinizatora kapaciteta 80 m<sup>3</sup>/danu, planirane vodospreme volumena 800 m<sup>3</sup>, te vodovodne mreže koja je u izgradnji. Planirana je instalacija PV elektrane snage 1300 kW i baterije kapaciteta 400 kW/1600 kWh.

Analiziran je referentni scenarij u kojemu je prikazan rad desalinizatora u ovisnosti o cijeni električne energije. Veliko opterećenje otoka ljeti uzrokuje opterećenje desalinizatora kad on radi konstantno punim kapacitetom. Simulacijom vodovodnih prilika u EPANET-u prikazana je mogućnost i potencijal softvera, međutim potrebno je korištenje kvalitetnijih i detaljnijih podataka da bi se provela detaljna analiza. Analizom odnosa cijene uvoza i referentne cijene otkupa električne energije, model bira hoće li koristiti bateriju (ako je  $c_{\text{uvoz}} > RC$ ) odnosno uvoz energije (ako je  $c_{\text{uvoz}} < RC$ ) za pokrivanje potražnje za električnom energijom u noćnim satima. U referentnom scenariju pretežito se koristi uvoz zbog relativno niske cijene, stoga je faktor kapaciteta baterije 2,96%. Analiziran je alternativni referentni scenarij u kojem je cijena uvoza postavljena da bude veća od RC kako bi se maksimalno iskoristila baterija, a energija bi se uvozila samo onda kad bi to bilo nužno. Faktor kapaciteta baterije u tom scenariju jednak je 12,45%.

Provedenom analizom referentnog scenarija zaključeno je da postoji nedostatak vode tijekom vršnih ljetnih mjeseci u iznosu od 1291 m<sup>3</sup>. Predviđeno je da će se nedostatna količina vode nadopuniti opskrbom vode iz vodonosca. Međutim, u svrhu postizanja energetske i vodovodno neovisnog otoka, ponuđena su rješenja u obliku alternativnih scenarija s kojima se ovaj problem može riješiti. Prvi scenarij (OB), vezan je za energetske sustav optimizirajući kapacitet baterije kako bi se postigla neovisnost o uvozu, pri čemu snaga PV elektrane ostaje 1300 kW. Kapacitet baterije znatno ovisi o kriznim danima u siječnju kad je slaba insolacija pa model odabire pretjerano veliki kapacitet da nadomjesti nedostatak proizvedene energije. Izračunat je kapacitet od 1002 kW/4012 kWh s kojim otok postaje energetske neovisan o uvozu energije.

Ostali scenariji su vezani za vodovodni sustav, pri čemu su korištena snaga PV elektrane i kapacitet baterije isti kao u referentnom scenariju. Optimizacijom desalinizatora (OD) ustanovljeno je da bi njegov kapacitet trebao biti veći za 26% kako bi snabdijevao otok dovoljnom količinom vode, čime bi njegova vršna snaga iznosila 34,88 kW.

Analizirani su scenariji u kojima se povećanjem ili implementacijom postojećih spremnika postiže vodovodna neovisnost otoka tehnologijom pohrane vode. Kapacitet desalinizatora

pritom ostaje 80 m<sup>3</sup>/danu, kao i u referentnom scenariju. Optimizacijom vodospreme (OV) izračunat je volumen od 2099 m<sup>3</sup> koji osigurava dovoljno veliku rezervu da ljeti ne dođe do nedostatka vode. Postojeće javne cisterne (PS) na otoku predstavljaju veliki kapacitet za pohranu vode s ukupnim volumenom od 1550 m<sup>3</sup>, stoga je analiziran scenarij u kojima su one iskorištene kako bi ponudile dodatnu vodenu rezervu. Isto se može poduzeti s kućnim spremnicima (KS), te se uz pretpostavku da četvrtina stambenih objekata (73) ima spremnik volumena 20 m<sup>3</sup> dobije velika rezerva od 1460 m<sup>3</sup> koja se spajanjem na vodovodnu mrežu može iskoristiti za optimizaciju vodovodnog sustava.

Analiziran je scenarij implementacije metoda uštede vode (UV) koji je baziran na edukaciji stanovništva, brendiranju otoka kao samoodrživog i postavljanju tehnologija uštede. Izračunato je da se uštedom od 20%, tj. smanjivanjem potražnje za vodom na otoku za 20%, može postići energetska neovisnost otoka. Posljednji scenarij (RSV) ne rješava problem nedostatne količine vode, već razmatra mogućnost korištenja postojećih spremnika u svrhu poljoprivrede rekuperacijom sive vode iz sustava odvodnje. S obzirom na količinu sive vode od 7967 m<sup>3</sup> godišnje koja bi se ispustila u more, postoji potencijal na otoku za iskorištavanje vode u svrhu poljoprivrede. Međutim, potrebna je dodatna analiza isplativosti i izvedivosti ovog scenarija da bi se dobili konkretniji rezultati.

Projekti vodovoda i odvodnje, te instalacije sustava fotonaponske elektrane i baterije su u početnoj fazi, stoga su prikazani i analizirani scenariji koji mogu ponuditi vrijedne informacije za budući razvoj. Očekuje se da će nakon prve faze izgradnje doći do prikupljanja podataka o potrošnji vode i električne energije na manjoj vremenskoj rezoluciji, čime se omogućava provjera točnosti navedenih pretpostavki te se otvaraju mogućnosti za detaljniju analizu.

**LITERATURA**

- [1] Smart islands initiative, <http://www.smartislandsinitiative.eu/en/index.php> (pristup stranici 2.6.2020.)
- [2] Hemetek, B. *Planiranje energetskeg sustava otoka Lošinja primjenom RenewIslands metodologije*. Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2008.
- [3] Bošković, F. *Napredno energetske planiranje sektora transporta na otoku Krku*. Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2019.
- [4] Bratić, S. *Planiranje razvoja energetske samodostatnog otoka Unije*. Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2011.
- [5] Dodić, M. *Integracija solarnih fotonaponskih sustava na pametnim otocima*. Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2019.
- [6] Aroussy, Youssef & Nachtane, Mourad & Saifaoui, Dennoun & Tarfaoui, Mostapha & Farah, Y & Abid, M. Malek. (2016). [\*USING RENEWABLE ENERGY FOR SEAWATER DESALINATION AND ELECTRICITY PRODUCTION IN THE SITE OCP MOROCCO\*](#). Journal of Science and Arts. 2016. 395-406. (pristup stranici 2.6.2020.)
- [7] Tzen, Eftihia & Morris, Richard. (2003). [\*Renewable Energy Sources for Desalination. Solar Energy\*](#). 75. 375-379. 10.1016/j.solener.2003.07.010. (pristup stranici 2.6.2020.)
- [8] Kumar, Gaurav & Karney, Bryan. (2007). [\*Electricity Usage in Water Distribution Networks\*](#). 2007 IEEE Canada Electrical Power Conference, EPC 2007. 97 - 102. 10.1109/EPC.2007.4520313. (pristup stranici 2.6.2020.)
- [9] Urban Danish, <https://www.urbandanish.solutions/smartislands2018/en/program/> (pristup stranici 3.6.2020.)
- [10] Grad Krk, <https://www.grad-krk.hr/krk-prvi-pametni-otok-prica-o-futuristickom-otoku-koji-postaje-pionir-razvoja-novih-tehnologija-i-ocuvanja-okolisa/> (pristup stranici 3.6.2020.)
- [11] The blockchain land, <https://theblockchainland.com/2019/03/05/blockchain-role-developing-smart-cities/> (pristup stranici 3.6.2020.)
- [12] INSULAE h2020, <http://insulae-h2020.eu> (pristup stranici 3.6.2020.)
- [13] Otoci.eu, <https://www.otoci.eu/unije-zapoceo-projekt-insulae/> (pristup stranici 3.6.2020.)
- [14] REA Kvarner, <http://www.reakvarner.hr/projekti/medunarodni-projekti/insulae> (pristup stranici 3.6.2020.)

- [15] Google maps, <https://www.google.hr/maps> (pristup stranici 4.6.2020.)
- [16] Otok Unije, <http://otok-unije.com/ounijama/> (pristup stranici 4.6.2020.)
- [17] Visit Lošinj, <https://www.visitlošinj.hr/hr/unije.aspx> (pristup stranici 15.6.2020.)
- [18] World wildlife, <https://www.worldwildlife.org/threats/water-scarcity> (pristup stranici 5.6.2020.)
- [19] Daily Mercury, <https://www.dailymercury.com.au/news/approaching-crisis-world-running-out-water/3190831/> (pristup stranici 5.6.2020.)
- [20] U.S. Geological Survey, [https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/desalination?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/desalination?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects) (pristup stranici 5.6.2020.)
- [21] Zotalis, Konstantinos & Dialynas, Emmanuel & Mamassis, N. & Angelakis, A.. (2014). [Desalination Technologies: Hellenic Experience. Water. 6. 1134-1150. 10.3390/w6051134.](https://doi.org/10.3390/w6051134) (pristup stranici 5.6.2020.)
- [22] 123rf, [https://www.123rf.com/photo\\_80631818\\_stock-vector-distillation-apparatus-diagram-with-full-process-and-lab-tools-including-thermometer-burner-condense.html](https://www.123rf.com/photo_80631818_stock-vector-distillation-apparatus-diagram-with-full-process-and-lab-tools-including-thermometer-burner-condense.html) (pristup stranici 5.6.2020.)
- [23] thoughtco, <https://www.thoughtco.com/what-is-distillation-601964> (pristup stranici 6.6.2020.)
- [24] Puretecwater, <https://puretecwater.com/reverse-osmosis/what-is-reverse-osmosis> (pristup stranici 6.6.2020.)
- [25] Kandrwaterservice, <http://www.kandrwaterservice.com/discussing-some-pros-and-some-cons-of-reverse-osmosis/> (pristup stranici 6.6.2020.)
- [26] Warsinger, David M.; Tow, Emily W.; Nayar, Kishor G.; Maswadeh, Laith A.; Lienhard V, John H. (2016). [Energy efficiency of batch and semi-batch \(CCRO\) reverse osmosis desalination](https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.07.022) Water Research. 106: 272–282. (pristup stranici 1.7.2020.)
- [27] Ghermandi, Andrea & Messalem, Rami. (2009). [Solar-driven desalination with reverse osmosis: The state of the art. Desalination and Water Treatment](https://doi.org/10.5004/dwt.2009.723), 7, 285-296. Desalination and water treatment. 7. 285-296. 10.5004/dwt.2009.723. (pristup stranici 7.6.2020.)
- [28] Encyclopedia Of Desalination And Water Resources, <http://www.desware.net/Energy-Requirements-Desalination-Processes.aspx> (pristup stranici 7.6.2020.)
- [29] McClatchyDC, <https://web.archive.org/web/20140324202006/http://www.mcclatchydc.com/2014/03/20/221880/israel-no-longer-worried-about.html> (pristup stranici 7.6.2020.)

- [30] Heck, N. Paytan, A. Potts, D.C. Haddad, B. [\*Predictors of local support for a seawater desalination plant in a small coastal community\*](#). Institute of Marine Sciences, University of California, Santa Cruz (pristup stranici 8.6.2020.)
- [31] Ludwig, H. *Hybrid systems in seawater desalination – practical design aspects, present status and development perspectives*. Desalination. 164: 1., 2004. (pristup stranici 2.7.2020.)
- [32] Local Authority Building and Maintenance, <https://labmonline.co.uk/features/bolstering-rainwater-harvesting-stormwater-capabilities/> (pristup stranici 8.6.2020.)
- [33] Balasubramanian, A.. (2019). [\*Water Conservation Practices\*](#). 10.13140/RG.2.2.13771.03365. (pristup stranici 8.6.2020.)
- [34] Sprinkler Drainage, <https://www.sprinklerdrainage.com/blog/how-much-will-a-drip-irrigation-system-save-me/> (pristup stranici 2.7.2020.)
- [35] ATS Irrigation, <https://www.atsirrigation.com/do-you-know-the-6-major-parts-of-a-drip-irrigation-system/> (pristup stranici 8.6.2020.)
- [36] US Environmental Protection Agency <https://www.epa.gov/watersense/watersense-products> (pristup stranici 2.7.2020.)
- [37] Mayer, P.W.; DeOreo, W.B.; Opitz, E.M.; Kiefer, J.C.; Davis, W.Y.; Dziegielewski, B.; & Nelson, J.O, *Residential End Uses of Water*. AWWARF and AWWA, Denver, 1999.
- [38] Forbes, <https://www.forbes.com/sites/houzz/2015/03/31/11-ways-to-save-water-at-home/#3bd71eae166c> (pristup stranici 8.6.2020.)
- [39] Komunikacija s profesorom i asistentom
- [40] Stunjek, G. 2019. JPG datoteka
- [41] Prpić, E. *Idejno rješenje projekta SE Unije*, 2DP Projekt d.o.o., Viškovo, 2019.
- [42] Jardas, D., Krajačić, G., Mimica, M., Širić, I. *Naponske prilike u elektroenergetskoj mreži oko otoka Unije prilikom priključenja solarne elektrane i baterijskog spremnika*, Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije, Šibenik, 2020.
- [43] Elaborat zaštite okoliša – *Sustav vodoopskrbe i sustav odvodnje i pročišćavanja sanitarnih otpadnih voda otoka Unije*, hidroing d.o.o., Osijek, 2017.
- [44] Čurin, M. 2020. JPG datoteka
- [45] US Environmental Protection Agency, <https://www.epa.gov/water-research/epanet> (pristup stranici 10.6.2020.)
- [46] Todini, E. & Pilati, S. 1987. *A gradient method for the analysis of pipe networks*. International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution, Leicester Polytechnic, UK, September 8-10

- [47] Salgado, R., Todini, E., & O'Connell, P.E. 1988. *Extending the gradient method to include pressure regulating valves in pipe networks*. Proc. Inter. Symposium on Computer Modeling of Water Distribution Systems, University of Kentucky, May 12-13.
- [48] Calliope, <https://calliope.readthedocs.io/en/stable/user/introduction.html>
- [49] Sierksma, G., Zwols, Y. *Linear and Integer Optimization: Theory and Practice, Third Edition*. CRC Press, 2015.
- [50] Idejni projekt - *Elektrotehnički projekt fotonaponska elektrana Unije 1 MW*, HEP d.d., Zagreb, 2020.
- [51] PVGIS estimates of solar electricity generation, <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis> (pristup stranici 19.6.2020.)
- [52] Podatci iz projekta INSULAE
- [53] Trifunović, N. *Introduction to Urban Water Distribution*, IHE Delft, 2006.
- [54] Novi list, <https://www.novolist.hr/regija/sustav-za-desalinizaciju-susak-i-unije-konacno-dobili-vlastitu-pitku-vodu/> (pristup stranici 15.6.2020.)
- [55] Advisian, <https://www.advisian.com/en-gb/global-perspectives/the-cost-of-desalination> (pristup stranici 15.6.2020.)
- [56] IRENA, [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/May/IRENA\\_Renewable-Power-Generations-Costs-in-2018.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/May/IRENA_Renewable-Power-Generations-Costs-in-2018.pdf) (pristup stranici 15.6.2020.)
- [57] Clubb, David. (2015). [Renewable energy roadmap for Wales](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/444444/Renewable_energy_roadmap_for_Wales.pdf). 10.13140/RG.2.1.3160.7523. (pristup stranici 10.6.2020.)
- [58] Solar power world online, <https://www.solarpowerworldonline.com/2019/07/nrel-says-utility-scale-batteries-can-provide-peaking-capacity-on-the-grid-if-costs-keep-coming-down/> (pristup stranici 10.6.2020.)
- [59] Maier, Olaf. (2015). [Operation & Maintenance Costs of Photovoltaic Power Plants: a Swiss Benchmark and Outlook](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/444444/Operation_Maintenance_Costs_of_Photovoltaic_Power_Plants_a_Swiss_Benchmark_and_Outlook.pdf). 10.13140/RG.2.1.4644.8164. (pristup stranici 10.6.2020.)
- [60] Larsson P., Börjesson Ph. [Cost models for battery energy storage systems](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/444444/Cost_models_for_battery_energy_storage_systems.pdf). Bachelor of Science Thesis EGI-2018 TRITA-ITM-EX 2018:428.
- [61] CROPEX, <https://www.cropex.hr/hr/>
- [62] Tarifni sustav za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije, Zakon o Energiji NN 120/2012
- [63] Frenkel, V. [Brackish vs. Seawater Desalination: Which Is More Cost-Effective?](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/444444/Brackish_vs_Seawater_Desalination_Which_Is_More_Cost-Effective.pdf), World Environmental and Water Resources Congress 2007, Tampa (pristup stranici 28.6.2020.)

---

[64] Istraživačka grupa Zavoda za energetska postrojenja, energetiku i okoliš, [\*Predinvesticijska studija opskrbe otoka Silbe pitkom vodom iz desalinizatora i fotonaponske elektrane\*](#), Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu, 2020. (pristup stranici 29.6.2020.)

**PRILOZI**

- I. CD-R disc
- II. Dodatak



## DODATAK

### REF scenarij

```
pv_power_plant:
  essentials:
    name: 'PV power plant'
    color: '#F9D956'
    parent: supply
    carrier_out: electricity
  constraints:
    resource: file=pv_resource.csv:PVGIS #PVGIS
    resource_unit: energy # kWh
    export_cap: 1000 #kW
    export_carrier: electricity
    energy_cap_equals: 1300 # kW
    force_resource: true
    lifetime: 25
  costs:
    monetary:
      interest_rate: 0.1
      energy_cap: 900 #EUR/kW
      om_annual: 5 #EUR/kW
      export: -0.070 #EUR/kWh

pv_desalination:
  essentials:
    name: 'PV desalination plant'
    color: '#CFF956'
    parent: supply
    carrier_out: electricity
  constraints:
    resource: file=pv_resource.csv:PVGIS #PVGIS
    resource_scale: 0.00539532510494871 #max power equal to 7 kW
    resource_unit: energy # kWh
    energy_cap_equals: 7 # kW
    force_resource: true
    lifetime: 25
  costs:
    monetary:
      interest_rate: 0.1
      energy_cap: 1125 #EUR/kW
      om_annual: 10 #EUR/kW
```

```
grid:
  essentials:
    name: 'National grid import'
    parent: supply
    carrier_out: electricity
  constraints:
    energy_cap_equals: 400 #kW
    resource: file=import.csv:pattern
    resource_unit: energy
    force_resource: false
  costs:
    monetary:
      om_prod: file=price_import.csv:price
```

```
battery:
  essentials:
    name: 'Battery storage'
    #color: '#3B61E3'
    color: '#3283E2'
    parent: storage
    carrier: electricity
  constraints:
    storage_initial: 0.5
    energy_cap_equals: 400 # kW
    storage_cap_equals: 1600 # kWh
    energy_cap_per_storage_cap_equals: 0.25
    force_asynchronous_prod_con: true
    lifetime: 25
  costs:
    monetary:
      interest_rate: 0.10
      storage_cap: 300 # EUR per kWh storage capacity
      om_annual: 8.81 #EUR/kW
```

```
water_tank_hill:
  essentials:
    name: 'Water tank hill'
    parent: storage
    carrier: water
  constraints:
    storage_initial: 0.5
    force_asynchronous_prod_con: false
    energy_cap_equals: 40 # m3/h
    storage_cap_equals: 800 # m3
    energy_cap_per_storage_cap_equals: 0.05
```

```
desalination:
  essentials:
    name: 'Desalination plant'
    parent: conversion
    color: '#46EDF6'
    carrier_in: electricity
    carrier_out: water
  constraints:
    energy_eff: 0.12077
    energy_cap_equals: 3.33333 # m3/h
    lifetime: 20
  costs:
    monetary:
      interest_rate: 0.1
      energy_cap: 132000 #EUR/m3/h
      om_con: file=price_desalination.csv:price
```

```
demand_electricity:
  essentials:
    name: 'Electricity demand'
    color: '#2F0669'
    parent: demand
    carrier: electricity
```

```
demand_pumps:
  essentials:
    name: 'Pumps electricity demand'
    parent: demand
    carrier: electricity
```

```
demand_water:
  essentials:
    name: 'Water demand'
    parent: demand
    carrier: water
```

```
electricity_transmission:
  essentials:
    name: 'Electricity transmission'
    color: '#6783E3'
    parent: transmission
    carrier: electricity
```

```
water_pipe:
  essentials:
    name: 'Water pipe network'
    parent: transmission
    carrier: water
```

## Lokacije

```

Desalination_plant:
  coordinates: {lat: 44.6350, lon: 14.2492}
  techs:
    desalination:
    pv_desalination:

Water_tank_hill:
  coordinates: {lat: 44.6386, lon: 14.2525}
  techs:
    water_tank_hill:

Unije:
  coordinates: {lat: 44.637, lon: 14.249}
  techs:

    demand_electricity:
      constraints:
        resource: file=demand_electricity.csv:demand
    demand_water:
      constraints:
        resource: file=demand_water.csv:m3/h
    demand_pumps:
      constraints:
        resource: file=demand_pumps.csv:demand

Unije_PV_battery:
  coordinates: {lat: 44.631, lon: 14.259}
  techs:
    pv_power_plant:
    battery:

Losinj, Unije:
  techs:
    electricity_transmission:
      constraints:
        one_way: true

Unije_PV_battery, Unije:
  techs:
    electricity_transmission:
      constraints:
        one_way: true

Desalination_plant, Unije:
  techs:
    electricity_transmission:
      constraints:

Desalination_plant, Water_tank_hill:
  techs:
    water_pipe:
      constraints:
        one_way: true

Water_tank_hill, Unije:
  techs:
    water_pipe:
      constraints:
        one_way: true

```

## 1. OB scenarij

```
battery:
  essentials:
    name: 'Battery storage'
    #color: '#3B61E3'
    color: '#3283E2'
    parent: storage
    carrier: electricity
  constraints:
    storage_initial: 0.5
    energy_cap_min: 400 # kW
    storage_cap_min: 1600 # kWh
    energy_cap_per_storage_cap_equals: 0.25
    force_asynchronous_prod_con: true
    lifetime: 25
  costs:
    monetary:
      interest_rate: 0.10
      storage_cap: 300 # EUR per kWh storage capacity
      om_annual: 8.81 #EUR/kW

# Losinj:
#   coordinates: {lat: 44.5663, lon: 14.3923}
#   techs:
#     grid:
```

## 2. OD scenarij

```
desalination:
  essentials:
    name: 'Desalination plant'
    parent: conversion
    color: '#46EDF6'
    carrier_in: electricity
    carrier_out: water
  constraints:
    energy_eff: 0.12077
    energy_cap_min: 3.3333 # m3/h
    lifetime: 20
  costs:
    monetary:
      interest_rate: 0.1
      energy_cap: 132000 #EUR/m3/h
      om_con: file=price_desalination.csv:price
```

## 3. OV scenarij

```

water_tank_hill:
  essentials:
    name: 'Water tank hill'
    parent: storage
    carrier: water
  constraints:
    storage_initial: 0.5 #fraction of full capacity
    force_asynchronous_prod_con: false
    energy_cap_min: 40 # m3/h
    storage_cap_min: 800 # m3
    energy_cap_per_storage_cap_equals: 0.05

```

#### 4. PS scenarij

```

water_tank_school:
  essentials:
    name: 'Water tank school'
    parent: storage
    carrier: process_water
  constraints:
    storage_initial: 0.5 #fraction of full capacity
    force_asynchronous_prod_con: false
    energy_cap_equals: 8 # m3/h
    storage_cap_equals: 350 # m3

water_tank_church:
  essentials:
    name: 'Water tank church'
    parent: storage
    carrier: process_water
  constraints:
    storage_initial: 0.5 #fraction of full capacity
    force_asynchronous_prod_con: false
    energy_cap_equals: 8 # m3/h
    storage_cap_equals: 350 # m3

water_tank_lc:
  essentials:
    name: 'Water tank Local committee'
    parent: storage
    carrier: process_water
  constraints:
    storage_initial: 0.5 #fraction of full capacity
    force_asynchronous_prod_con: false
    energy_cap_equals: 8 # m3/h
    storage_cap_equals: 850 # m3

Water_tank_church:
  coordinates: {lat: 44.6384, lon: 14.2525}
  techs:
    water_tank_church:

Water_tank_school:
  coordinates: {lat: 44.6382, lon: 14.2525}
  techs:
    water_tank_school:

Water_tank_lc:
  coordinates: {lat: 44.6382, lon: 14.2525}
  techs:
    water_tank_lc:

```

```
Water_tank_hill, Water_tank_church:
  techs:
    water_pipe:
      constraints:
        one_way: true

Water_tank_hill, Water_tank_school:
  techs:
    water_pipe:
      constraints:
        one_way: true

Water_tank_hill, Water_tank_lc:
  techs:
    water_pipe:
      constraints:
        one_way: true

Water_tank_church, Unije:
  techs:
    water_pipe:
      constraints:
        one_way: true

Water_tank_school, Unije:
  techs:
    water_pipe:
      constraints:
        one_way: true

Water_tank_lc, Unije:
  techs:
    water_pipe:
      constraints:
        one_way: true
```

## 5. KS scenarij

```
water_tank_homes:
  essentials:
    name: 'Water tank homes'
    parent: storage
    carrier: water
  constraints:
    storage_initial: 0.5 #fraction of full capacity
    force_asynchronous_prod_con: false
    energy_cap_equals: 123 # m3/h
    storage_cap_equals: 1460 # m3
```

```
Unije:
  coordinates: {lat: 44.637, lon: 14.249}
  techs:
    water_tank_homes:
    demand_electricity:
      constraints:
        resource: file=demand_electricity.csv:demand
    demand_water:
      constraints:
        resource: file=demand_water.csv:m3/h
    demand_pumps:
      constraints:
        resource: file=demand_pumps.csv:demand
```

## 7. RSV scenarij

```
drainage:
  essentials:
    name: 'Drainage'
    parent: supply
    carrier_out: process_water

demand_agro:
  essentials:
    name: 'Agricultural demand'
    parent: demand
    carrier: process_water

drainage_pipe:
  essentials:
    name: 'Drainage pipe'
    parent: transmission
    carrier: process_water
```



```
Drainage:
  coordinates: {lat: 44.6360, lon: 14.2480}
  techs:
    drainage:
      constraints:
        resource: file=demand_water.csv:drainage

Water_tank_church:
  coordinates: {lat: 44.6358, lon: 14.2480}
  techs:
    water_tank_church:

Water_tank_lc:
  coordinates: {lat: 44.6356, lon: 14.2481}
  techs:
    water_tank_lc:

Water_tank_school:
  coordinates: {lat: 44.6352, lon: 14.2481}
  techs:
    water_tank_school:

Agriculture:
  coordinates: {lat: 44.6300, lon: 14.2480}
  techs:
    demand_agro:
      constraints:
        resource: file=demand_agro.csv:m3/h
```

```
Drainage, Water_tank_church:
  techs:
    drainage_pipe:
      constraints:
        one_way: true

Drainage, Water_tank_lc:
  techs:
    drainage_pipe:
      constraints:
        one_way: true

Drainage, Water_tank_school:
  techs:
    drainage_pipe:
      constraints:
        one_way: true

Water_tank_church, Agriculture:
  techs:
    drainage_pipe:
      constraints:
        one_way: true

Water_tank_lc, Agriculture:
  techs:
    drainage_pipe:
      constraints:
        one_way: true

Water_tank_school, Agriculture:
  techs:
    drainage_pipe:
      constraints:
        one_way: true
```