

Usporedna analiza alata za energetska planiranje - Calliope i EnergyPLAN

Prusec, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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:235:668202>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-26**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Luka Prusec

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Goran Krajačić, dipl. ing.

Student:

Luka Prusec

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Goranu Krajačiću i asistentu mag. ing. Marku Mimici na detaljnoj pomoći tijekom izrade ovog rada te svojoj obitelji i prijateljima na pruženoj podršci.

Luka Prusec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za završne 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 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Luka Prusec**

Mat. br.: 0035207534

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Usporedna analiza alata za energetska planiranje – Calliope i EnergyPLAN**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Comparative analysis of energy planning tools – Calliope and EnergyPLAN**

Opis zadatka:

Donošenjem novih legislativnih uredbi, Europska unija ulaže značajne napore kako bi se što više ubrzala energetska tranzicija kontinenta. Sukladno tome, značaj alata za energetska planiranje ubrzano raste. Pojedini alati imaju specifične prednosti i nedostatke koje je potrebno utvrditi. Otoci su postavljeni u poseban fokus energetske tranzicije zbog specifičnih uvjeta koji na njima prevladavaju. Uspješna rješenja za energetska tranziciju otoka se mogu primijeniti i na kopnu, čime otoci postaju predvodnici energetske tranzicije.

U sklopu ovog završnog rada, potrebno je provesti usporednu analizu dvaju alata za energetska planiranje – Calliope i EnergyPLAN. Analiza treba biti izvedena na primjeru otoka u Kvarnerskom arhipelagu. Potrebno je predložiti plan energetske tranzicije promatranog arhipelaga, a fokus rada treba biti analiza plana tranzicije u oba alata te usporedba dobivenih rezultata.

U okviru završnog rada potrebno je:

1. Opisati te istaknuti najvažnije specifičnosti i razlike promatranih alata.
2. Provesti analizu Kvarnerskog arhipelaga prikupljajući podatke o potrošnji energije i karakteristikama promatranih sustava.
3. Predložiti plan energetske tranzicije Kvarnerskog arhipelaga.
4. Provesti proračun predloženog plana u oba alata te analizirati rezultate i navesti zaključke analize.

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

Zadatak zadan:

30. studenoga 2020.

Zadatak zadao:

Datum predaje rada:

1. rok: 18. veljače 2021.

2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.

3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 22.2. – 26.2.2021.

2. rok (izvanredni): 9.7.2021.

3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Predsjednik Povjerenstva:

V Soldo

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

Izv.prof.dr.sc. Goran Krajačić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. UVOD.....	1
2. METODA	2
2.1. Calliope	2
2.2. EnergyPLAN	3
3. ANALIZIRANI CASE STUDY.....	4
3.1. Stvaranje modela u Calliope-u	4
3.1.1. Tehnologije.....	5
3.1.1.1. Tehnologije opskrbe.....	6
3.1.1.2. Tehnologije potrošnje.....	7
3.1.1.3. Tehnologije pohrane.....	8
3.1.1.4. Tehnologije konverzije.....	8
3.1.1.5. Tehnologije prijenosa.....	9
3.1.2. Lokacije i veze	10
3.1.2.1. Krasica.....	11
3.1.2.2. Crikvenica	12
3.1.2.3. Rab.	12
3.1.2.4. Krk i Batomalj.....	13
3.1.2.5. Cres i Orlec.....	13
3.1.2.6. Mali Lošinj i njegova obala.....	14
3.2. Stvaranje modela u EnergyPLAN-u.....	16
3.2.1. Potražnja.....	16
3.2.2. Opskrba	16
3.2.3. Uravnoteženje i pohrana.....	18
3.2.4. Troškovi	19
3.3 Vremenska razlučivost	19
4. REZULTATI	20
5. ZAKLJUČAK.....	31
LITERATURA.....	32

POPIS SLIKA

Slika 1. Raspored direktorija modela u Calliope-u [5].....	4
Slika 2. Primjer koda za kombiniranu plinsko-parnu turbinu [5]	5
Slika 3. Primjer koda tehnologije opskrbe i njenih karakteristika (kopnena vjetroelektrana) ...	6
Slika 4. Primjer podatkovne CSV datoteke potrošnje električne energije na više lokacija	7
Slika 5. Primjer koda za tehnologiju pohrane (litij-ionski baterijski sustav).....	8
Slika 6. Primjer koda za tehnologije konverzije (dizalica topline – zrak)	9
Slika 7. Primjer koda za lokaciju [5].....	10
Slika 8. Primjer koda za vezu između dvije lokacije [5].....	11
Slika 9. Lokacije korištene u modelu	11
Slika 10. Prikaz veza lokacija u sučelju Calliope-a	14
Slika 11. Srednja godišnja brzina vjetra u Republici Hrvatskoj [25].....	15
Slika 12. Modeliranje potrošnje električne energije u EnergyPLAN-u	17
Slika 13. Modeliranje potrošnje energije za ogrjevne procese u EnergyPLAN-u	17
Slika 14. Modeliranje potrošnje energije za rashladne procese u EnergyPLAN-u.....	18
Slika 15. Modeliranje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije	18
Slika 16. Modeliranje karakteristika dizalice topline.....	19
Slika 17. Modeliranje baterijskog sustava u EnergyPLAN-u	19
Slika 18. Grafički prikaz instaliranih kapaciteta na svakoj lokaciji.....	21
Slika 19. Grafički prikaz proizvodnje i potrošnje energije iz različitih izvora iz sučelja Calliope-a	22
Slika 20 Uvoz i izvoz električne energije u model EnergyPLAN-a	22
Slika 21. Uvoz i izvoz električne energije u model Calliope-a.....	23
Slika 22. Potrošnja energije iz baterijskog sustava u Calliope-u za karakteristični ljetni dan.	24
Slika 23. Potražnja za električnom energijom za karakteristični ljetni dan	24
Slika 24. Napunjenost baterijskog sustava u karakterističnom zimskog tjednom periodu - EnergyPLAN	25
Slika 25. Napunjenost baterijskog sustava u karakterističnom zimskog tjednom periodu - Calliope	25
Slika 26. Napunjenost baterijskog sustava u karakterističnom proljetnom tjednom periodu - EnergyPLAN	26

Slika 27. Napunjenost baterijskog sustava u karakterističnom proljetnom tjednom periodu - Calliope	27
Slika 28. Napunjenost baterijskog sustava godišnje u EnergyPLAN-u	28
Slika 29. Izvoz električne energije solarne Elektrane Orlec i Batomalj tijekom karakterističnog ljetnog tjedna - EnergyPLAN	29
Slika 30. Izvoz električne energije solarne Elektrane Orlec i Batomalj tijekom karakterističnog ljetnog tjedna - Calliope	29
Slika 31. Potražnja i proizvodnja toplinske energije tijekom karakterističnog zimskog tjedna - Calliope	30

POPIS TABLICA

Tablica 1. Tehnologije opskrbe korištene u modelu	6
Tablica 2. Tehnologije potrošnje korištene u modelu	7
Tablica 3. Tehnologije pohrane korištene u modelu	8
Tablica 4. Tehnologije konverzije korištene u modelu	9
Tablica 5. Tehnologije prijenosa korištene u modelu	10
Tablica 6. Rezultati kapaciteta svih tehnologija opskrbe i pohrane	20

SAŽETAK

U ovom radu provedena je usporedna analiza dva alata za energetska planiranje – Calliope i EnergyPLAN. Različite lokacije i tehnologije su odabrane i dodane u model na primjeru otoka u Kvarnerskom arhipelagu. Rezultat je dao najoptimalnije rješenje kapaciteta i iznosa proizvodnje električne i toplinske energije iz različitih tehnologija. U radu su korišteni podatci o potrošnji energije otoka Krka za 2017. godinu prikupljeni za izradu znanstvenog članka [1]. Iznosi potrošnje su potom skalirani ovisno o broju stanovnika u drugim otočnim mjestima. Kako je Calliope alat za optimiziranje, a EnergyPLAN za simulaciju, kapaciteti tehnologija nisu ograničeni i Calliope-u je dan zadatak optimizirati kapacitete koji se onda koriste za stvaranje modela u EnergyPLAN-u. Nakon rezultata oba modela, daje se usporedna analiza rezultata te se navode prednosti i nedostaci svakog alata.

Ključne riječi: energetska planiranje, optimizacija, pametni otoci

SUMMARY

This paper shows comparative analysis of two energy planning tools – Calliope and EnergyPLAN. Different locations and technologies on the Kvarner archipelago were chosen for the model. Results of the model gave the most optimal solution in terms of technology capacities and their production of electrical and heat energy. Data for energy consumption that was used in the model is the data for energy consumption for the island of Krk in 2017 which was collected for a scientific article [1]. Scaling was done proportional to the number of inhabitants for every island location used. Since Calliope is tool for optimization and EnergyPLAN is a tool for simulation, results of technology capacities from Calliope were used to define EnergyPLAN model. With the results from the both models, comparative analysis was undertaken and the advantages and disadvantages of each tool are highlighted.

Key words: energy planning, optimisation, smart islands

1. UVOD

Sredinom 18. stoljeća s ciljem unaprjeđenja proizvodnih procesa razvija se parni stroj i započinje Prva industrijska revolucija. Ovaj period dovodi do promjene čovječanstva u pozitivnom smislu, dovodi do rasta ekonomije, automatizacije mnogih procesa i otvaranja prostora za istraživanje dosega novih tehnologija. U tom brzorastućem društvu razvijaju se nova zanimanja i napuštaju stara, manje efikasna. Negativne posljedice ovog uzleta osjetit će se tek dva stoljeća kasnije kada se razvija svijest o štetnom utjecaju emisija fosilnih goriva. Zbog efekta staklenika svake se godine bilježe temperaturni rekordi koji rezultiraju sve ekstremnijim vremenskim uvjetima. Zbog toga, većina zemalja svijeta na čelu s Europskom Unijom potpisale su Pariški sporazum u prosincu 2015. godine. Dugoročni cilj je do 2050. smanjiti emisiju stakleničkih plinova i ne dopustiti povećanje temperature za 2°C u odnosu na razdoblje prije industrijskih revolucija [2]. Alat za ovaj cilj je razvoj industrije obnovljivih izvora energije i penaliziranje povećanih emisija stakleničkih plinova. Hrvatska je članica Europske Unije od srpnja 2013. godine i aktivno sudjeluje u njenim inicijativama. Od ratificiranja Pariškog sporazuma značajna financijska sredstva uložena su u razvoj OIE što je rezultiralo povećanjem efikasnosti tehnologija i njihove proizvodnje te padom cijene električne energije. Europska Unija nastavlja provoditi tranziciju s različitim inovativnim rješenjima pa je 2017. godine stvorena inicijativa „Pametnih otoka“. Ideja je da određeni otoci postanu u potpunosti energetske samodrživi i time daju primjer koji bi se mogao implementirati i na kopnena područja [3]. Na energetske ovisne otoke treba transportirati fosila goriva, a nerijetko su strujom povezani podmorskim elektroenergetskim kablovima čija ugradnja i održavanje predstavljaju značajan trošak. Takvi argumenti daju jasnu sliku da su otoci, kao male sredine s manjom potrošnjom, najbolji kandidati za potpuno odvajanje od kopnene mreže. Ugradnja obnovljivih izvora energije na njima smanjila bi cijenu električne energije za njihove stanovnike, omogućila bi otvaranje novih radnih mjesta i veću energetske neovisnost o kopnu. Hrvatska je potpisala ovaj dokument s ciljem da u njemu sudjeluju i otoci iz Cresko-lošinjskog arhipelaga. U ovom završnom radu fokus je na stvaranju modela grupe otoka s tehnologijama pretežno obnovljivih izvora energije i njihovoj optimizaciji. Za lokacije unutar sustava odabrani su idući otoci: Krk, Rab, Cres i Lošinj. Modeliranje se provodi u dva alata – Calliope-u i EnergyPLAN-u te se potom okreće međusobnoj usporedbi rezultata.

2. METODA

2.1. Calliope

Calliope je besplatan alat otvorenog koda temeljen na programskom jeziku Python. Omogućava modeliranje energetskih sustava od manjih razina poput gradskih okruga do modeliranja energetskog sustava cijele države ili kontinenta. Razvio ga je, te ga i dalje unaprjeđuje, interdisciplinarni istraživač s instituta za tehnologiju u Zurichu Stefan Pfenninger (trenutna verzija 0.6.6. - listopad 2020. godine). Calliope djeluje tako da se putem razvojnog sučelja (eng. IDE) stvore podatkovne .yaml datoteke u kojima su opisane tehnologije sustava nakon čega slijedi njihova optimizacija. Optimizira se linearnim programiranjem pomoću instaliranih komercijalnih matematičkih solvera. U ovom radu korišten je Gurobi. Modeliranje energetskih sustava omogućuje analitičarima da formiraju interno koherentne scenarije kako se energija dobiva, transportira, troši ili pretvara u druge oblike energije. Calliope je osmišljen za rješavanje pitanja o prelasku na obnovljive izvore energije pa se u ovom radu tijekom modeliranja stavlja fokus na tehnologije obnovljivih izvora energije [4].

Karakteristike Calliope-a su:

- stvaranje energetskih sustava s visokim udjelom obnovljivih izvora energije;
- varijabilna prostorna i vremenska razlučivost;
- mogućnost za rad s realnim ulaznim podacima;
- razdvojenost koda od podataka u modelu;
- lako izmjenjiv model i njegova pristupačnost za rad;
- pojednostavljenje implementacije u veće sustave.

2.2. EnergyPLAN

EnergyPLAN je program za energetske planiranje razvijen na danskom sveučilištu Aalborg. Stvoren je s ciljem analize energetske, okolišne i gospodarske utjecaja različitih strategija. Analizom se stvara više od jednog scenarija i u konačnici odabire najoptimalnije rješenje na temelju zadanih početnih uvjeta. Besplatan je i moguće ga je preuzeti na njihovoj službenoj stranici <https://www.energyplan.eu/> (trenutna verzija 16.0 – Lipanj 2021. godine). EnergyPLAN je već korišten za niz znanstvenih radova istraživača iz cijelog svijeta i etabliran je u energetske industriji. Razlikuje se od Calliope-a u tome što korisnik programa zadaje fiksne kapacitete tehnologija koje onda EnergyPLAN simulira. U EnergyPLAN-u su navedene sve moguće vrste tehnologija opskrbe i potražnje te pohrane čiji se kapaciteti podešavaju od strane korisnika. Program je stvoren s ciljem da osmisle niskougljični energetske sustavi kakvi se predviđaju u daljnjoj budućnosti (za par desetljeća), a ne unutar bliže budućnosti (par godina unaprijed). Koristi deterministički model što znači da za isti modelirani sustav uvijek daje isto rješenje na satnoj razlučivosti. Iznosi godišnje potrošnje električne i toplinske energije definirani su tekstualnim folderom od 8784 redaka predstavljajući korišten kapacitet svakog sata cijele (prijestupne) godine [5].

Karakteristike EnergyPLAN-a:

- pristup velikoj mreži korisnika
- pristupačan za korištenje i brz u davanju rezultata
- satna analiza cjelokupnog energetske sustava
- mogućnost usavršavanja preko besplatnih video lekcija i detaljnog priručnika
- već dostupna satna distribucija proizvodnje i potrošnje uz mogućnost dodavanja vlastite
- mogućnost implementacije u MATLAB

-

3. ANALIZIRANI CASE STUDY

3.1. Stvaranje modela u Calliope-u

Modeli u Calliope-u su definirani pomoću YAML datoteka čitljivih na računalo, te CSV datoteka za podatke specifičnih vrijednosti kroz neki vremenski period u obliku jednostavnih tablica. Modifikacija YAML datoteteka vrši se u razvojnom sučelju (eng. integrated development environment), a u ovom radu korišten je PyCharm Community Edition. CSV datoteke su modificirane u Microsoft Excelu. Raspored direktorija svakog novog modela uobičajeno izgleda kao na slici 1. s razlikama u podatkovnim CSV datotekama. Oznaka + na slici označava direktorij, a – datoteku.

```
+ example_model
  + model_config
    - locations.yaml
    - techs.yaml
  + timeseries_data
    - solar_resource.csv
    - electricity_demand.csv
  - model.yaml
  - scenarios.yaml
```

Slika 1. Raspored direktorija modela u Calliope-u [5]

YAML datoteka tehnologija je popis svih tehnologija u sustavu. Te tehnologije su potom svrstane na lokacije unutar njene YAML datoteke. Podatkovne CSV datoteke su u konačnici referencirane unutar tehnologija u YAML datoteci lokacija. U datoteci model.yaml određuju se ime modela, verzija Calliope-a, naziv direktorija u kojemu su CSV datoteke, te vremenski period simulacije. Nadalje sadrži i podatke za cilj simulacije i matematički solver za provedbu simulacije. U ovom radu je korišten komercijalni solver Gurobi, za kojeg je preuzeta akademska licenca.

3.1.1. Tehnologije

Svaka tehnologija u kodu je mora biti definirana osnovnim podacima. To su ime tehnologije, boja tehnologije (u heksidecimalnom zapisu), vrsta tehnologije (parent) i nosioc energije. Ime i boja služe za diferenciranje od ostalih tehnologija sintaksom i grafički. Vrsta tehnologije objašnjava dinamiku energije u sustavu. Energija se ovisno o vrsti može unositi ili iznositi iz sustava, pohranjivati, transformirati ili kretati unutar sustava. Nosioc energije je uobičajeno struja ili toplina. Uz osnovne podatke tehnologiju se može karakterizirati ograničenjima i financijskim podacima. Calliope nudi još mnoštvo karakteristika tehnologija koje se mogu, ali ne moraju dodavati. Njihovim dodavanjem model postaje precizniji i u konačnici je sposoban dati bolji rezultat. Ako dodatne karakteristike nisu definirane, pri pokretanju modela uzet će se njihova zadana (default) vrijednost prema tehničkoj dokumentaciji. U ovom završnom radu karakteristike tehnologija su preuzete iz kataloga Danske Energetske Agencije [6].

```
ccgt:
  essentials:
    name: 'Combined cycle gas turbine'
    color: '#FDC97D'
    parent: supply
    carrier_out: power
  constraints:
    resource: inf
    energy_eff: 0.5
    energy_cap_max: 40000 # kW
    energy_cap_max_systemwide: 100000 # kW
    energy_ramping: 0.8
    lifetime: 25
  costs:
    monetary:
      interest_rate: 0.10
      energy_cap: 750 # USD per kW
      om_con: 0.02 # USD per kWh
```

Slika 2. Primjer koda za kombiniranu plinsko-parnu turbinu [5]

Kako je fokus bio na obnovljivim izvorima energije, u case study-u su odabrane većinski tehnologije obnovljivih izvora energije čiji će se instalirani kapacitet povećavati u budućnosti. Svakoju tehnologiji se u kodu dodaju njene karakteristike koje Calliope nudi i razumije pri pokretanju modela. Modeliranje tehnologija se provodilo i na temelju projekata koji su najavljeni, u provedbi ili već u određenoj mjeri realizirani na tim lokalitetima. Calliope dijeli tehnologije na više vrsta.

3.1.1.1. Tehnologije opskrbe

Tehnologije opskrbe su one kojima se energija unosi u sustav. Energija koja se unosi u sustav u ovom radu je isključivo električna dok se toplinska energija dobiva uz tehnologija pretvorbe. Dvije su vrste tehnologija opskrbe u modelu. U prvu spadaju trafostanice koje se nalaze na rubu granice energetskog sustava i koje dovode električnu energiju proizvedenu van sustava. Druga vrsta su obnovljivi izvori energije koji proizvode električnu energiju unutar granica sustava. Energija proizvedena od strane obnovljivih izvora energije je modelirana tako da se ne mora nužno sva potrošiti unutar sustava već je otvorena mogućnost za njen izvoz u distribucijsku mrežu van sustava.

Tablica 1. Tehnologije opskrbe korištene u modelu

Tehnologije opskrbe	Opis
Trafostanica 400/220/110 kV	Unos električne energije na rubu sustava
Trafostanica 110/20 kV	
Solarni paneli na stambenim objektima	Obnovljivi izvori električne energije unutar sustava
Solarana elektrana	
Kopnena vjetroelektrana	
Priobalna vjetroelektrana	

```

wind_onshore:
  essentials:
    name: 'Vjetroelektrana - Krk'
    color: '#33FFFF'
    parent: supply
    carrier_out: electricity
  constraints:
    export_carrier: electricity
    resource: file=KrkWindGen.csv
    resource_unit: energy_per_cap # kWh/kW
    energy_cap_max: inf
    lifetime: 27
  costs:
    monetary:
      interest_rate: 0.10
      energy_cap: 1120 #EUR per kW, 2020
      om_annual: 14 # EUR/kW, 2020, medium
      om_prod: 0.000001
      export: file=Export_halfhourly_prices.csv

```

Slika 3. Primjer koda tehnologije opskrbe i njenih karakteristika (kopnena vjetroelektrana)

3.1.1.2. Tehnologije potrošnje

Tehnologijama potrošnje definiraju se potrošači u sustavu. Najogledniji primjer potrošnje jest potrošnja električne i toplinske energije u kućanstvima. U radu se koriste podatci za potrošnju električne i toplinske energije otoka Krka iz 2017. godine. Zahtjevi za količinom električne energije rastu proporcionalno sa stanovništvom pa je stoga potrošnja na ostalim naseljenim lokacijama skalirana proporcionalno s većim ili manjim brojem u odnosu na stanovništvo otoka Krka. Podatci za potrošnju su zapisani u „comma separated values“ datoteci (.csv), koja se modificira u Microsoft Excelu. Vremenska razlučivost je polusatna, pa tablica sadrži 17520 redaka za cijelu godinu. Iznos potrošnje je u jedinici kWh i ima negativan predznak predstavljajući izlaz energije iz modeliranog sustava. Zarezom je prvo odvojeno vrijeme mjerenja od potrošnje, a potom iznosi potrošnje na lokacijama. Lokacije moraju imati isti naziv u kodu YAML datoteke kao i u podatkovnim CSV datotekama.

Tablica 2. Tehnologije potrošnje korištene u modelu

Tehnologije potrošnje	Opis
Potrošnja električne energije	.csv podatkovne datoteke dobivene polusatnim mjerenjem kroz cijelu godinu
Potrošnja toplinske energije	

	A
1	,X3,X4,X5,X6
2	2017-01-01 00:00:00,-2720.98600463728,-2596.022182156457,-385.77149229063167,-3908.8603258255
3	2017-01-01 00:30:00,-2565.17022419084,-2265.210025160396,-336.61247494886004,-3660.22168983121
4	2017-01-01 01:00:00,-2468.72670956981,-1911.365421788771,-284.0308130432332,-3319.21658018794
5	2017-01-01 01:30:00,-2398.93513920116,-1913.650553052624,-284.370385834173,-3392.79875667677
6	2017-01-01 02:00:00,-2241.72815884771,-1477.330618021159,-219.53280716856224,-3014.3542497993
7	2017-01-01 02:30:00,-2128.18155771013,-1393.330142755613,-207.05025254362687,-3027.50603846378
8	2017-01-01 03:00:00,-2042.67799533083,-1159.8017433428981,-172.34769886249802,-2824.48966474969
9	2017-01-01 03:30:00,-2056.61818693097,-1158.3192994668364,-172.12740622007135,-2803.54274362072
10	2017-01-01 04:00:00,-2079.61413647088,-1297.288957651493,-192.77843639596955,-2947.66422395284
11	2017-01-01 04:30:00,-1927.48250898046,-1100.339234002169,-163.51151051195632,-2861.65701265374
12	2017-01-01 05:00:00,-1861.51822893824,-1017.100831972489,-151.14220073194386,-2824.70338625463
13	2017-01-01 05:30:00,-2074.46262122916,-1179.8373571657687,-175.3250111121904,-2794.59494732483
14	2017-01-01 06:00:00,-2131.16745362415,-1412.669124599654,-209.9240445846332,-3019.35443447162
15	2017-01-01 06:30:00,-2240.88614025956,-1640.6065948650898,-243.79578060354723,-3181.141667648

Slika 4. Primjer podatkovne CSV datoteke potrošnje električne energije na više lokacija

3.1.1.3. Tehnologije pohrane

Tehnologije pohrane služe za čuvanje energije u sustavu ako ne postoji trenutna potražnja za njenim iskorištenjem. Neophodne su zbog značajnog udjela solarnih panela u sustavu. Proizvodnja električne energije iz sunca doseže vrhunac sredinom dana, dok je najveća potrošnja u večernjim satima. Taj fenomen je poznat kao 'The Duck Curve' i predstavlja veliki izazov u razvoju i implementaciji obnovljivih izvora energije u budućnosti.

Tablica 3. Tehnologije pohrane korištene u modelu

Tehnologije pohrane	Opis
Litij-ionski baterijski sustav	Skladištenje energije

```

battery_LiIon:
  essentials:
    name: 'Baterijski sustav'
    color: '#40FF00'
    parent: storage
    carrier: electricity
  constraints:
    energy_cap_max: 4000 # kW
    storage_cap_max: 8000
    energy_cap_per_storage_cap_equals: 0.5
    #ratio of maximum charge/discharge (kW) for a given maximum storage capacity (kWh)
    energy_eff: 0.975
    lifetime: 25
  costs:
    monetary:
      interest_rate: 0.10
      storage_cap: 142 # EUR per kWh storage capacity, 2030 cost
      om_prod: 0.002
      om_annual: 0.54
  
```

Slika 5. Primjer koda za tehnologiju pohrane (litij-ionski baterijski sustav)

3.1.1.4. Tehnologije konverzije

Tehnologijama konverzije energija se transformira iz jednog oblika u drugi na specifičnoj lokaciji. U modelu se ove tehnologije koriste za rješavanje problema otpada i dobivanje toplinske energije iz električne energije dizalicama topline. Dizalice topline su visokoučinkoviti sustavi putem kojih se neiskorištena ili neposredno neiskoristiva energija pretvara u iskoristivu toplinsku energiju. Primjenjuju se u svim veličinama, od onih najmanjih za grijanje

pojedinačnih životnih prostora, pa sve do sustava koji služe za grijanje čitavih naselja kao što je u slučaju ovog modela.

Tablica 4. Tehnologije konverzije korištene u modelu

Tehnologije konverzije	Opis
Dizalica topline (zrak kao toplinski izvor)	Pretvaraju nosioca energije iz struje u toplinu
Dizalica topline (podzemne vode kao toplinski izvor)	
Spalionica smeća	Stvaranje električne energije iz sortiranog otpada

```

HP_Air:
  essentials:
    name: 'Dizalica topline (Zrak)'
    color: '#EC6546'
    parent: conversion_plus
    carrier_out: [ heat, cooling ]
    primary_carrier_out: heat
    carrier_in: electricity
  constraints:
    energy_eff: 1 #radiators (not floor heating)
    # 1 because its COP is taken into account further down
    carrier_ratios:
      carrier_out:
        heat: 3.5
        cooling: 2.5
    lifetime: 18
  costs:
    monetary:
      interest_rate: 0.10
      energy_cap: 1750 #EUR/kW of heat production, 2020, for new one family houses
      om_prod: 0.0005

```

Slika 6. Primjer koda za tehnologije konverzije (dizalica topline – zrak)

3.1.1.5. Tehnologije prijenosa

Tehnologijama prijenosa energija se prenosi s jedne lokacije na drugu. Kako se u sustavu koristi samo struja kao nosioc energije, ona se prenosi dalekovodima. Zbog jednostavnosti modela toplinska energija se troši na mjestu gdje je proizvedena, ali kada bi se prenosila s lokacije na lokaciju koristile bi se toplinske cijevi kao tehnologija prijenosa.

Tablica 5. Tehnologije prijenosa korištene u modelu

Tehnologije prijenosa	Opis
Dalekovodi za distribuciju energije	Prenose energiju s lokacije na lokaciju
Dalekovodi za izvoz energije	Prenose energiju iz sustava obnovljivih izvora energije u distribucijski sustav

3.1.2. Lokacije i veze

U model je moguće unijeti neograničen broj lokacija. One su povezane tehnologijama prijenosa (Poglavlje 3.1.5.). Pri određivanju lokacija nužno je navesti njene koordinate koje se koriste za grafički prikaz u analizi kao i sve prisutne tehnologije na toj lokaciji. Kao i kod tehnologija, lokacijama se mogu ograničiti određene karakteristike kao i dodati financijske značajke.

Lokacije su u modelu podijeljene na dvije vrste. Prva vrsta su one lokacije na kojima će se nalaziti udjelom većinski potrošači toplinske i električne energije. Na takvim lokacijama su postavljene i određene tehnologije proizvodnje energije, ali udjelom je značajnija potrošnja energije na toj lokaciji. Za tu vrstu lokacija su korišteni najveći gradovi otoka na kojima se provodi model. To su gradovi Krk, Cres, Rab i Mali Lošinj.

Druga vrsta lokacija jesu one na kojima se provodi proizvodnja ili unos značajnije količine energije u model. Proizvodnja energije se odvija u elektranama na obnovljive izvore energije, a energija se unosi u model preko trafostanica. Trafostanice su prisutne na lokacijama Krasice, Crikvenice, dok su značajnije elektrane na obnovljive izvore energije prisutne na mjestima blizu otočkih gradova: Batomalj, Orlec, obala uz Mali Lošinj.

```

locations:
  region1:
    coordinates: {lat: 40, lon: -2}
    techs:
      unmet_demand_power:
      demand_power:
      ccgt:
      constraints:
        energy_cap_max: 30000

```

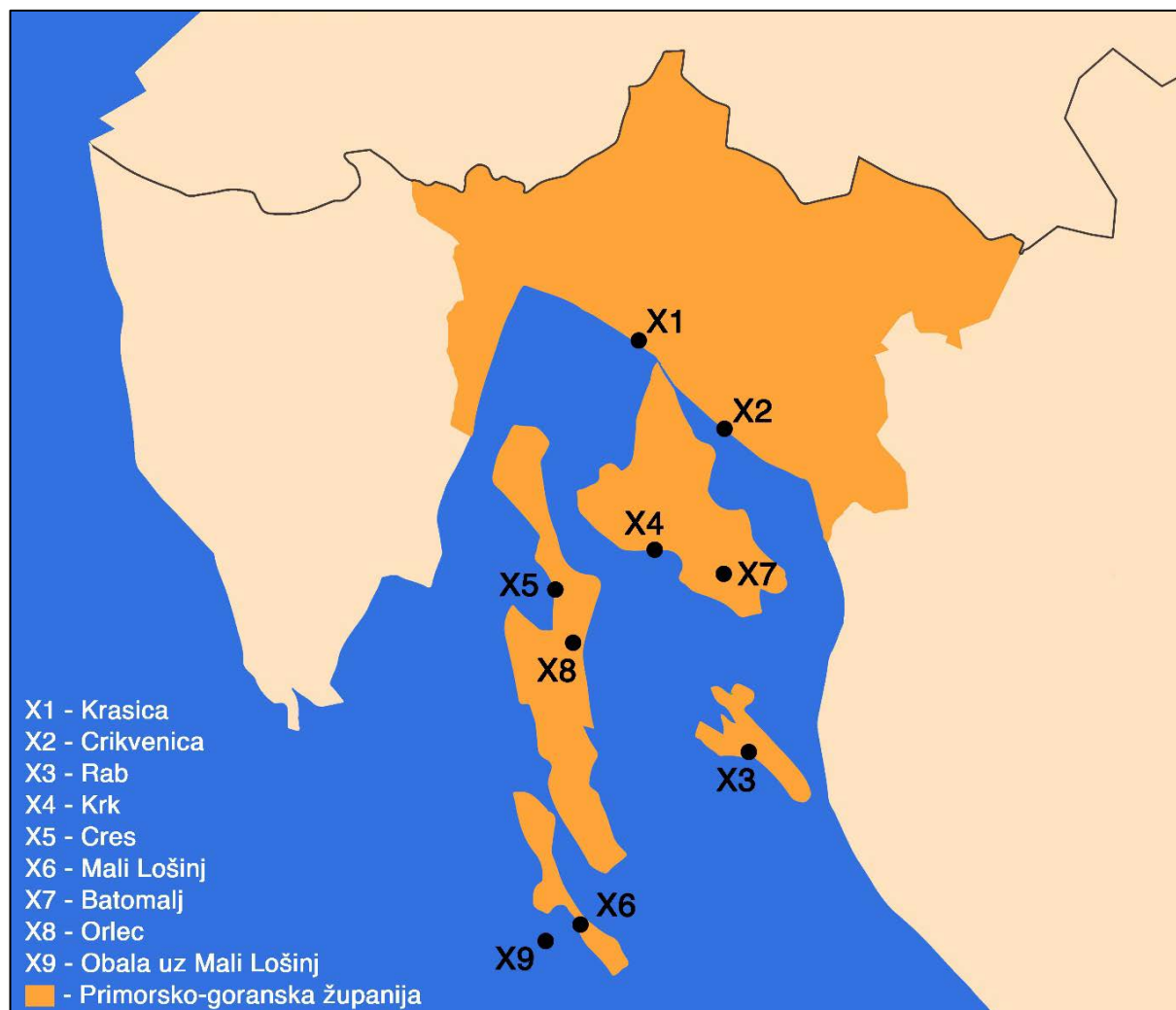
Slika 7. Primjer koda za lokaciju [5]

```

links:
  region1,region2:
    techs:
      ac_transmission:
        constraints:
          energy_cap_max: 10000
        costs.monetary:
          energy_cap: 100

```

Slika 8. Primjer koda za vezu između dvije lokacije [5]



Slika 9. Lokacije korištene u modelu

3.1.2.1. Krasica

Krasica je naselje u općini Bakar nedaleko od makroregionalnog središta Primorja, grada Rijeke [7]. Na sjevernom kraju mjesta nalazi se jedna od šest najvećih trafostanica u Hrvatskoj, trafostanica „Melina“ 400/220/110 kV [8]. Trafostanica „Melina“ je u provedenom modelu tehnologija opskrbe.

3.1.2.2. Crikvenica

Crikvenica je grad u Kvarnerskom zaljevu. Sastoji se od naselja Crikvenica i još tri turistička naselja: Selce, Dramalj i Jadranovo čija su širenja stvorila neprekinutu rivijeru dugu 7 kilometara. Zbog svoje lokacije i dobre povezanosti s prometnim čvorištem u Rijeci, Crikvenica se počela razvijati kao turističko središte već početkom 20. stoljeća. Prema popisu stanovnika iz 2011. godine broj stanovnika u gradu je 11 122 [9]. Svaka nova turistička sezona pokazuje trend porasta broja noćenja u Crikvenici (s izuzetkom 2020.), te je rekordne 2019. zabilježeno 2,2 milijuna noćenja [10]. Većina noćenja je u ljetnim mjesecima pa se javlja realna problematika dimenzioniranja energetskog sustava s tako velikim oscilacijama u broju korisnika električne energije. Ovaj izazov javlja se i u ostalim turističkim gradovima u nastavku ovog rada (Rab, Krk, Cres, Mali Lošinj). U Crikvenici se nalazi trafostanica 110/20 kV koja je u modelu dodana kao tehnologija opskrbe.

3.1.2.3. Rab

Rab je najveći grad na istoimenom otoku. U gradu živi 8065 stanovnika, dok je na cijelom otoku 9328 stanovnika [11]. U dokumentu „Strategija razvoja grada Raba do 2030.“ [12], kojeg 2019. godine objavljuje Grad Rab objavljen je opis i cilj mjere za poboljšanje energetskog sustava i korištenje obnovljivih izvora energije:

„Nužnost je odabir „čiste proizvodnje“ i „čistih tehnologija“, kao i potreba integracije politike zaštite okoliša u politiku prostornog razvoja.“

U sklopu tog strateškog cilja, grad Rab planira zamjenu konvencionalne rasvjete s LED rasvjetom i implementaciju pametnog sustava vanjske rasvjete te punionice električnih vozila. Na otoku Rabu nalazi se trafostanica 110/20 kV koja je u modelu dodana kao tehnologija opskrbe. Grad Rab ima 2417 sunčanih dana godišnje [13] što ga čini pogodnim za ugradnju solarnih panela. U modelu je zato zamišljena ugradnja solarnih panela na stambene objekte kao tehnologije opskrbe električne energije. Na lokaciji su također dodane dizalice toplice na zrak i podzemne vode kao tehnologije konverzije iz električne u toplinsku energiju. U svrhu pohranjivanja prekomjerne energije tijekom smanjene potrošnje u modelu se nalazi i litij-ionska baterija kapaciteta 8000 kWh.

3.1.2.4. Krk i Batomalj

Krk je najveći grad na istoimenom otoku. Prema popisu stanovništva iz 2011. godine, u gradu živi 6281 stanovnik, a na cijelom otoku 19 374 stanovnika [14]. Na otoku Krku bilježi se pozitivna stopa nataliteta, stalan razvoj poduzetništva i turizma, mostom je povezan s kopnom te se nalazi u blizini Rijeke, makroregionalnog središta Primorja. U ožujku 2017. godine, Krk se priključio „Inicijativi pametnih otoka“ pod pokroviteljstvom Europske Unije. Cilj ovog projekta je sinergija energetike, transporta, informacijskih i komunikacijskih tehnologija. Otoci zbog svoje kompliciranije energetske povezanosti s kopnom predstavljaju odličan poligon za implementiranje i optimiziranje sustava obnovljive energije. Zbog toga je u ovom modelu na otoku Krku, modelirana jedna solarna elektrana snage i jedna vjetroelektrana, obje kao tehnologije opskrbe električne energije. Odabrano mjesto za ove elektrane je visoravan zapadno iznad naselja Batomalj. Na tom mjestu već je 2015. godine predložen plan za gradnju vjetroparka s 12 do 24 vjetroagregata na 24 tisuće kvadrata zemljišta u državnom vlasništvu koji još nije ostvaren [15]. U gradu su dodane tehnologije za opskrbu toplinske energije, dizalice topline na zrak i podzemne vode, te litij ionska baterija kapaciteta kao tehnologija pohrane električne energije.

3.1.2.5. Cres i Orlec

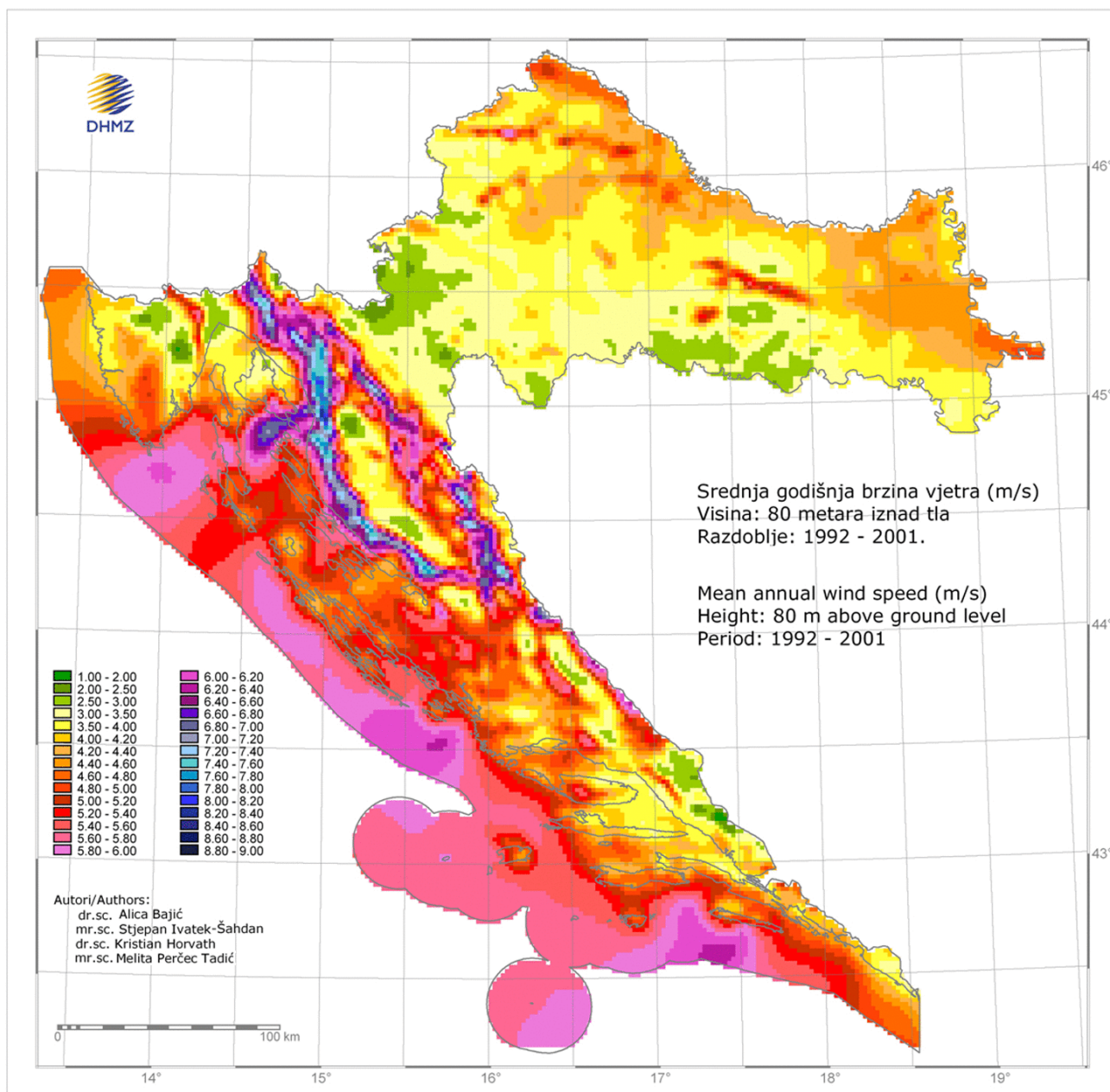
Cres je najveći grad na istoimenom otoku. Prema popisu stanovništva iz 2011. godine u gradu živi 2879 stanovnika, a na cijelom otoku 3079 stanovnika [16]. Cres je otok bogat zaštićenom mediteranskom vegetacijom te je važno stanište bjeloglavih supova, ugrožene ornitološke skupine. Od 2014. godine razvija se projekt solarne elektrane Orlec, koja bi trebala snabdijevati potrošnju električne energije 2500 kućanstava godišnje. Službena izgradnja je započela na ljeto 2020. godine, a planirana snaga iznosi 6,5 MW na području od 17 hektara [17]. Uz nju se od ljeta 2020. godine, u suradnji s gradom Malim Lošinjem, planira izgradnja solarne elektrane Ustrine snage 9,9 MW koja bi osim Cresa pokrivala i potrebe električne energije otoka Lošinja [18]. U modelu je solarna elektrana Orlec dodana kao tehnologija opskrbe električne energije i litij-ionski baterijski spremnik kao tehnologija pohrane.

3.1.2.6. Mali Lošinj i njegova obala

Mali Lošinj je najveći grad na otoku Lošinju. Prema popisu stanovništva iz 2011. godine u gradu živi 8116 stanovnika, a na cijelom otoku Lošinju 9587 stanovnika [19]. Na otoku Lošinju turizam se počeo razvijati još krajem 19. stoljeća. Iako je najudaljeniji od kopna u odnosu na ostale otočne gradove obuhvaćene u modelu, grad Mali Lošinj je jedan od najnaseljenijih otočnih gradova u Hrvatskoj. Tome uvelike pridonosi povezanost mostom sa Cresom, postojanje brodogradilišta i elitni turizam. Jadransko more zapadno od otoka Lošinja ima značajan potencijal za izgradnju priobalne vjetroelektane. Srednje godišnje brzine vjetra na tom području na visini od 80 m nadmorske visine dosežu brzine preko 5 m/s (Slika 11.). U modelu je kao tehnologija opskrbe za Mali Lošinj zato priobalna vjetroelektrana kao tehnologija opskrbe. Mali Lošinj, kao i svaki otok suočava se s problemom zbrinjavanja otpada. Educiranje stanovništva i ulaganje u nove tehnologije mjere su kojima je grad Mali Lošinj dospio u prvih deset gradova u Republici Hrvatskoj po udjelu odvojenog prikupljenog otpada. U 2018. postotak odvojenog otpada je iznosio 27,38%, a cilj je bio dostići 50% do 2020. godine [20]. U modelu za lokaciju Mali Lošinj nalazi se spalionica otpada kao tehnologija konverzije smeća u električnu energiju te dizalice topline na zrak i podzemnu vodu kao tehnologije konverzije električne u toplinsku energiju. Dodan je i litij-ionski baterijski sustav.



Slika 10. Prikaz veza lokacija u sučelju Calliopea



Slika 11. Srednja godišnja brzina vjetra u Republici Hrvatskoj [21]

3.2. Stvaranje modela u EnergyPLAN-u

Za razliku od Calliope-a, EnergyPLAN ima svoje sučelje u koje se unose početni uvjeti te se tako definira energetska sustav. Sučelje sadrži 4 tematski opširne podvrste za unos podataka. To su Potražnja (eng. Demand), Opskrba (eng. Supply), Uravnoteženje i pohrana (eng. Balancing and storage) te Trošak (eng. Cost). Uz te glavne stavke koje opisuju energetska sustav, dane su i podvrste za definiranje simulacije i način ispisivanja rezultata.

3.2.1. Potražnja

U ovom dijelu sučelja opisuje se redom potražnja za električnom energijom, grijanjem, hlađenjem, gorivom, transportom te desalinizacijom. Na temelju podataka potrošnje energije (električne i toplinske) s otoka Krka 2017. godine napravljeno je skaliranje prema broju stanovnika svih obuhvaćenih mjesta u modelu. Potražnja za električnom energijom iznosi 345,99 GWh godišnje. EnergyPLAN ne podržava mogućnost višestrukih dizalica topline unutar jednog modela pa je iznos potražnje energije za ogrjevne i rashladne procese objedinjen za dizalice koje rade na zrak i na podzemne vode. Njima je za zadovoljavanje potreba grijanja nužno 148,9 GWh električne energije, te 217,48 GWh električne energije za potrebe hlađenja. EnergyPLAN ima satnu razlučivost, pa je potražnja skalirana i uprosječena s polusatne na satnu razinu. Distribucija energije se očitava za svaki sat u godini iz TXT datoteke u kojoj jedan redak predstavlja jedan sat s vrijednošću od 0 do 1. Od tih 8784 redaka onaj s vrijednošću „1“ označava najveću satnu potrošnju cijele godine, a ostali sati se onda skaliraju ovisno o njihovoj manjoj potrošnji. 2017. godišnje najveća satna potražnja za električnom energijom bila je 20. kolovoza u 20 h u iznosu od 97210 kWh.

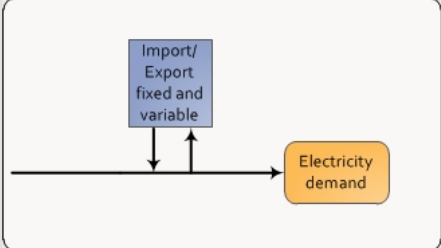
3.2.2. Opskrba

Kod Opskrbe su podaci o toplinskoj i električnoj energiji koja se unosi u sustav, kapacitetu trafostanica u sustavu, karakteristikama tehnologija obnovljivih izvora energije, solarnim kolektorima, dizalicama topline, upravljanju goriva, spalionicama otpada te emisijama CO₂. EnergyPLAN ne podržava unos više transformatorskih stanica u jednom modelu i zato su snage svih sumirane u jednu koja iznosi 240 MW. Dalekovodi za opskrbu električne energije imaju

kapacitet 100 MWh. Snage tehnologija obnovljivih izvora energije se unose prema rezultatima koje daje Calliope i opisane su u tablici 6. Iz solarnih elektrana se primjerice godišnje proizvede 107,14 GWh električne energije (slika 15.)

Electricity Demand and Fixed Import/Export

Electricity demand:	345,99	GWh/year	Change distribution	Distribucija potrosnje Energije.txt
Additional electricity demand	0	GWh/year	Change distribution	const.txt
Electric heating (IF included)	- 0	GWh/year	Subtract electric heating using distribution from 'individual' window	
Electric cooling (IF included)	- 0	GWh/year	Subtract electric cooling using distribution from 'cooling' window	
Elec. for Biomass Conversion	0,00	GWh/year	(Transferred from Biomass Conversion TabSheet)	
Elec. for Transportation	0,00	GWh/year	(Transferred from Transport TabSheet)	
Sum (excluding electric heating and cooling)	345,99	GWh/year		
Electric heating (individual)	0,00	GWh/year		
Electricity for heat pumps (individual)	0,00	GWh/year		
Electric cooling	0,00	GWh/year		
Flexible demand (1 day)	0	GWh/year	Max-effect	1000 kW
Flexible demand (1 week)	0	GWh/year	Max-effect	1000 kW
Flexible demand (4 weeks)	0	GWh/year	Max-effect	1000 kW
Fixed Import/Export	0	GWh/year	Change distribution	Hour_Tysklandsexport.txt
Total electricity demand*	345,99	GWh/year		



Slika 12. Modeliranje potrošnje električne energije u EnergyPLAN-u

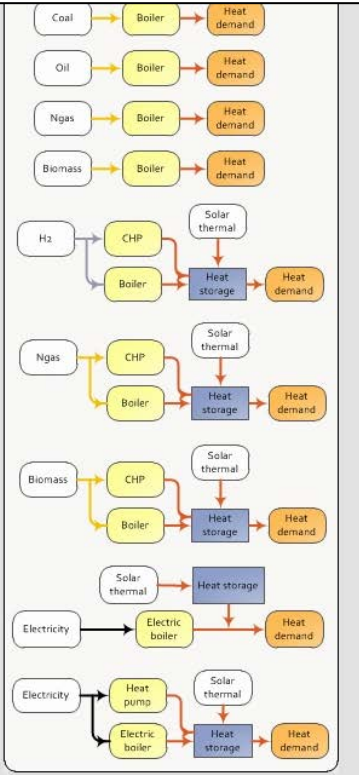
Total Heat Demand* : 148,90 Demand Per Building* : 15000 kWh/year Indv. heated households: 9327 Units

Individual Heating:

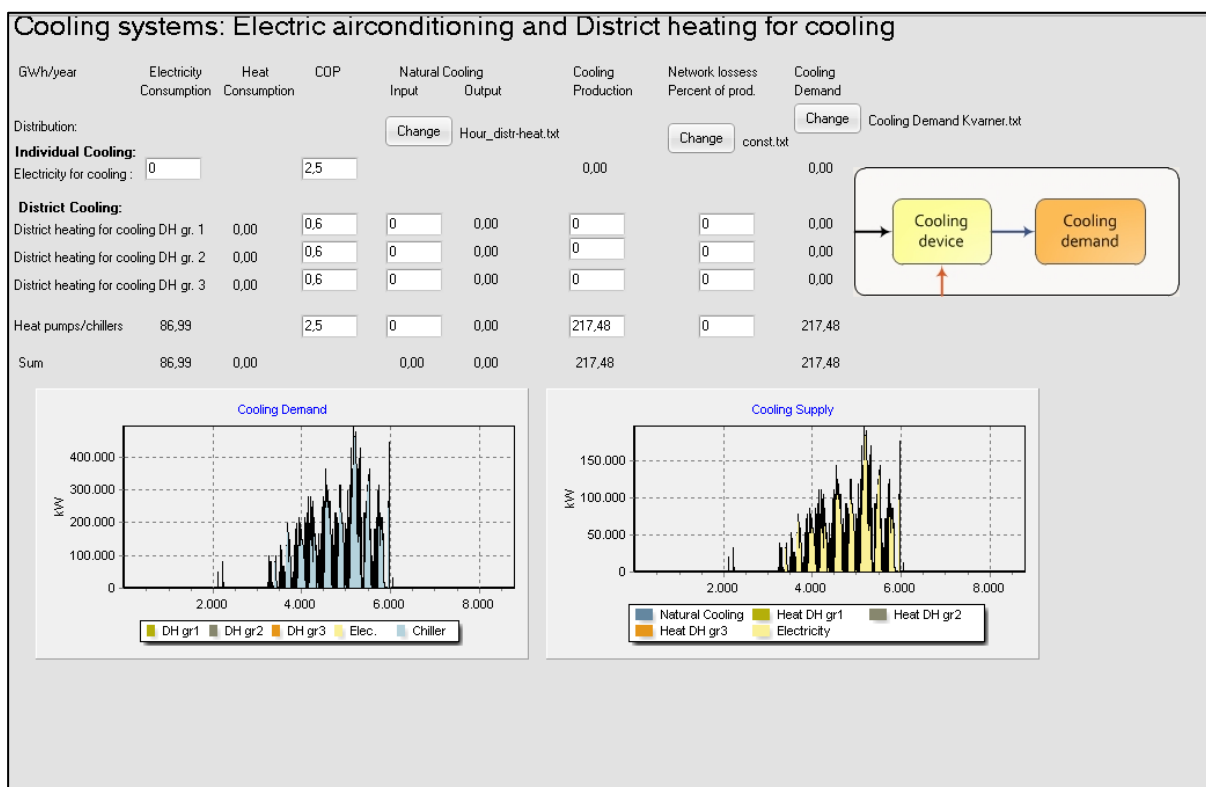
GWh/year	Fuel Input	Efficiency Thermal	Heat Demand	Efficiency Electric	Capacity Limit*	Estimated Electricity Production	Heat Storage* (Days of heat demand)	Solar Thermal Share*	Input	Output	Resulting Fuel Consumption*
Distribution: Heat Demand_Kvarner.txt											
Coal boiler :	0	0,7	0,00				0	1	0	0,00	0,00
Oil boiler :	0	0,8	0,00				0	1	0	0,00	0,00
Ngas boiler :	0	0,9	0,00				0	1	0	0,00	0,00
Biomass boiler :	0	0,7	0,00				0	1	0	0,00	0,00
H2 micro CHP :		0,5	0	0,3	1	0,00	0	1	0	0,00	0,00
Ngas micro CHP :		0,5	0	0,3	1	0,00	0	1	0	0,00	0,00
Biomass micro CHP :		0,5	0	0,3	1	0,00	0	1	0	0,00	0,00
Heat Pump :			148,903	3,5	1	-42,54	0	1	0	0,00	0,00
Electric heating :			0		1	0,00	0	1	0	0,00	0,00
Total Individual:			148,90			-42,54				0,00	0,00

District Heating:

Production:	Group 1:	Group 2:	Group 3:	Total:	Distribution:
	0	0	0	0,00	Change Hour_dist-heat.txt
Network Losses:	0,2	0,15	0,1		
Heat Demand:	0,00	0,00	0,00	0,00	



Slika 13. Modeliranje potrošnje energije za ogrjevne procese u EnergyPLAN-u



Slika 14. Modeliranje potrošnje energije za rashladne procese u EnergyPLAN-u

Variable Renewable Electricity				Estimated Production GWh/year	Correction factor	Estimated Post Correction production	Estimated capacity factor
Renewable Energy Source	Capacity: kW	Stabilisation share	Distribution profile*				
Wind	0	0	<input type="button" value="Change"/> Onshore vjetroele	0,00	0	0,00	0,00
Offshore Wind	0	0	<input type="button" value="Change"/> Offshore Vjetroele	0,00	0	0,00	0,00
Photo Voltaic	80000	0	<input type="button" value="Change"/> Solarna Elektran:	52,85	0	52,85	0,08
Photo Voltaic	80000	0	<input type="button" value="Change"/> Solarna Elektran:	54,29	0	54,29	0,08
Photo Voltaic	0	0	<input type="button" value="Change"/> Krovni PV.txt	0,00	0	0,00	0,00
Wave Power	0	0	<input type="button" value="Change"/> Hour_wave_200*	0,00	0	0,00	0,00
CSP Solar Power	0	0	<input type="button" value="Change"/> Hour_solar_prod1	0,00	0	0,00	0,00

Slika 15. Modeliranje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije

3.2.3. Uravnoteženje i pohrana

EnergyPLAN ima ograničenje od svega dva baterijska sustava u jednom modelu. Stoga se sa četiri baterijska spremnika na svim lokacijama prelazi na jedan sa zbrojem kapacitetom. Nova veća baterija u EnergyPLAN-u ima kapacitet 12 000 kW / 24 000 kWh sa efikasnošću baterije od 0,975.

Compression Heat Pumps			
Electric Capacity	<input type="text" value="76900"/>	<input type="text" value="0"/>	kW-e
COP	<input type="text" value="3,5"/>	<input type="text" value="3"/>	
Thermal Capacity	269150	0	kJ/s

Slika 16. Modeliranje karakteristika dizalice topline

Electricity Storage 1					Electricity Storage 2			
Charge	Capacities	Efficiencies	Fuel Ratio *)	Storage Capacity	Charge	Capacities	Efficiencies	Storage Capacity
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/> kW	<input type="text" value="0,975"/>		<input type="text" value="0"/> MWh	<input type="text" value="12000"/>	<input type="text" value="12000"/> kW	<input type="text" value="0,975"/>	<input type="text" value="24"/> MWh
Discharge	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0,975"/>	<input type="text" value="0"/>		Discharge	<input type="text" value="12000"/>	<input type="text" value="0,975"/>	
Allow for simultaneous operation of turbine and pump: <input type="button" value="No"/>								
*) Fuel ratio = fuel input / electric output (for CAES technologies or similar)								

Slika 17. Modeliranje baterijskog sustava u EnergyPLAN-u

3.2.4. Troškovi

EnergyPLAN je razvio vrlo detaljan ekonomski izračun uključujući mogućnosti zadavanja cijene po toni CO₂, kamatnih stopa, investicija u različitu opremu, cijene goriva i poreza. U sklopu ovog završnog rada neće se analizirati ekonomski rezultati.

3.3 Vremenska razlučivost

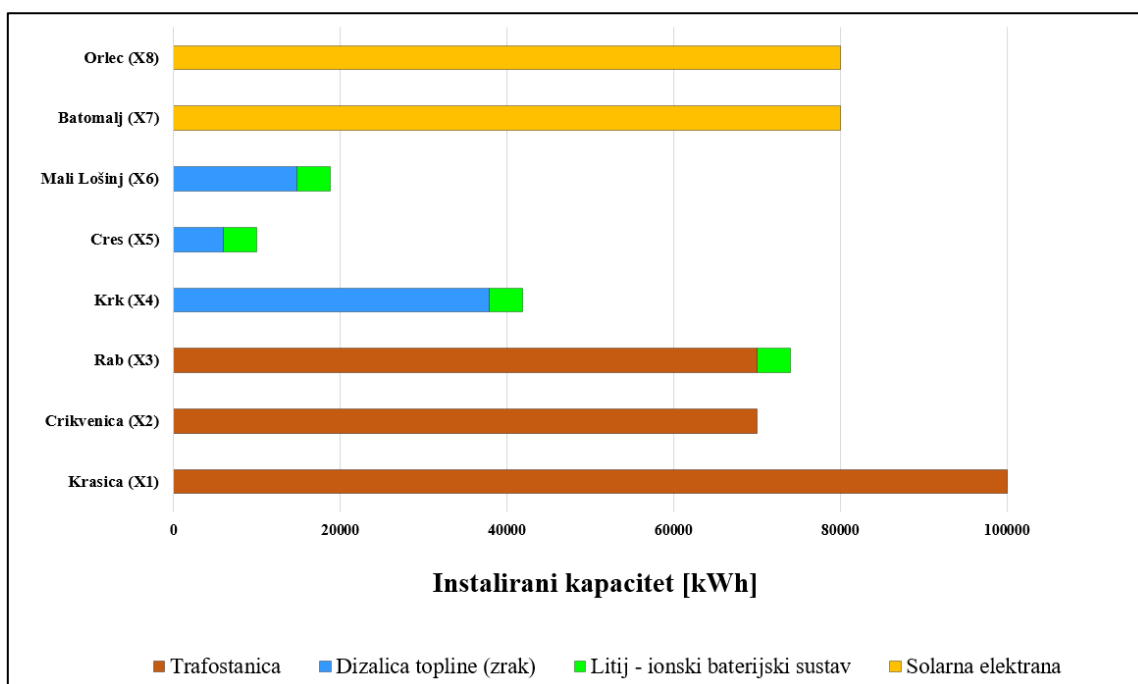
Rezultati dobiveni iz oba alata za energetske planiranje uspoređivati će se na više razina - dnevnoj, tjednoj i godišnjoj. Dnevni i tjedni rezultati će se uzimati iz tri karakteristična tjedna perioda kroz godinu. Ljetni tjedan u periodu 1.-8. kolovoza te zimski tjedan u periodu 1.-8. veljače, kada se očekuje najveće opterećenje sustava zbog graničnih temperatura u navedenim razdobljima godine. Treći period je proljetni tjedan u periodu 1.-8. svibnja kod kojeg se očekuje da će dati prosjek ta dva ekstrema. Podatci o proizvodnji i potrošnji energije u EnergyPLAN-u su na satnoj razini, a u Calliope-u na polusatnoj razini što ga u startu čini detaljnijim alatom za analizu rezultata.

4. REZULTATI

Dobiveni rezultati prikazuju samo jedan od mogućih više scenarija. Calliope u ovom scenariju stvara rezultate minimiziranjem troškova, a analiza drugih scenarija nije provedena jer je fokus ovog rada na usporedbi dva alata. Nakon pokretanja opisanog modela u Calliope-u (poglavlje 3.1) dobiveni su kapaciteti tehnologija. Kapaciteti nekih tehnologija ograničeni su gornjom vrijednošću prema dostupnim resursima naredbom `energy_cap_max`, ali za nijednu nije modelirana donja vrijednost kapaciteta (`energy_cap_min`) pa je time ostavljena mogućnost da Calliope ne odabire korištenje određene tehnologije. U nastavku su navedeni kapaciteti tehnologija opskrbe i pohrane.

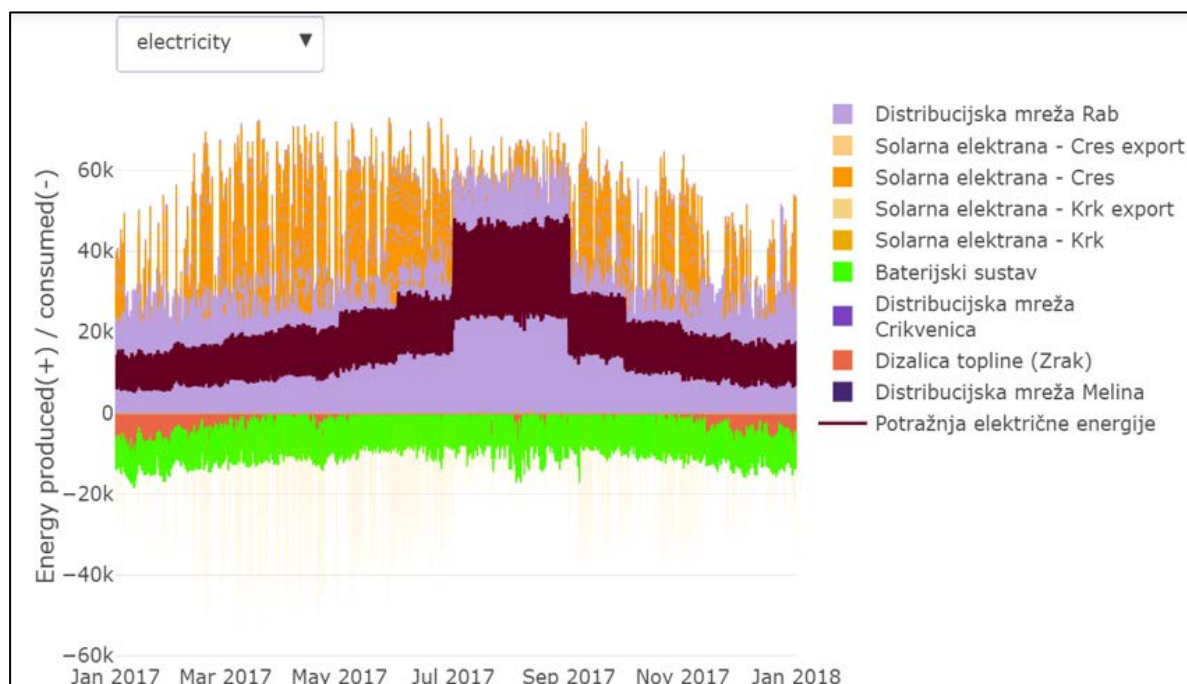
Tablica 6. Rezultati kapaciteta svih tehnologija opskrbe i pohrane

Lokacija	Tehnologije	Kapacitet
Krasica (X1)	Trafostanica Melina	100 000 kW
Crikvenica (X2)	Trafostanica Crikvenica	70 000 kW
Rab (X3)	Trafostanica Rab	70 000 kW
	Dizalica topline (zrak)	18 216,4 kW
	Dizalica topline (podzemna voda)	0 kW
	Litij - ionski baterijski sustav	4000 kW/8000 kWh
	Solarni paneli na stambenim objektima	7000 kW
Krk (X4)	Dizalica topline (zrak)	37 852,6 kW
	Dizalica topline (podzemna voda)	0 kW
	Litij - ionski baterijski sustav	4000 kW/8000 kWh
Cres (X5)	Dizalica topline (zrak)	6012,9 kW
	Dizalica topline (podzemna voda)	0 kW
	Litij - ionski baterijski sustav	4000 kW/8000 kWh
Mali Lošinj (X6)	Dizalica topline (zrak)	14 816,48 kW
	Dizalica topline (podzemna voda)	0 kW
	Spalionica smeća	0 kW
	Litij - ionski baterijski sustav	4000 kW/8000 kWh
Batomalj (X7)	Solarna elektrana	80 000 kW
	Vjetroelektrana	0 kW
Orlec (X8)	Solarna elektrana	80 000 kW
Obala uz Mali Lošinj (X9)	Priobalna vjetroelektrana	0 kW

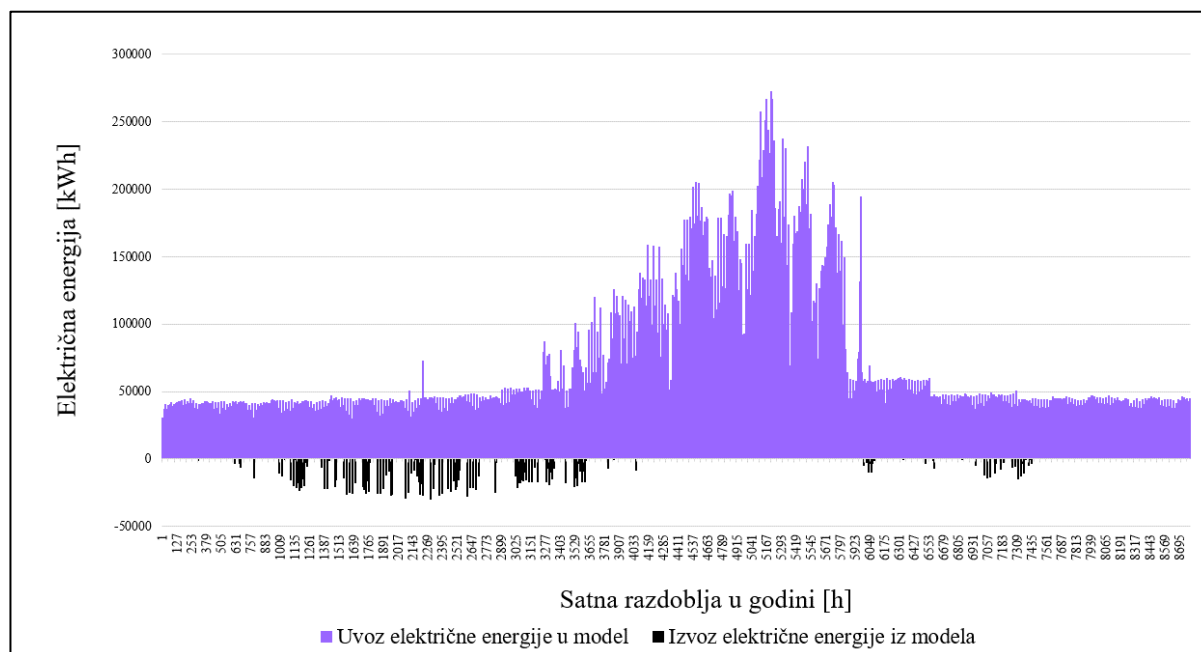


Slika 18. Grafički prikaz instaliranih kapaciteta na svakoj lokaciji

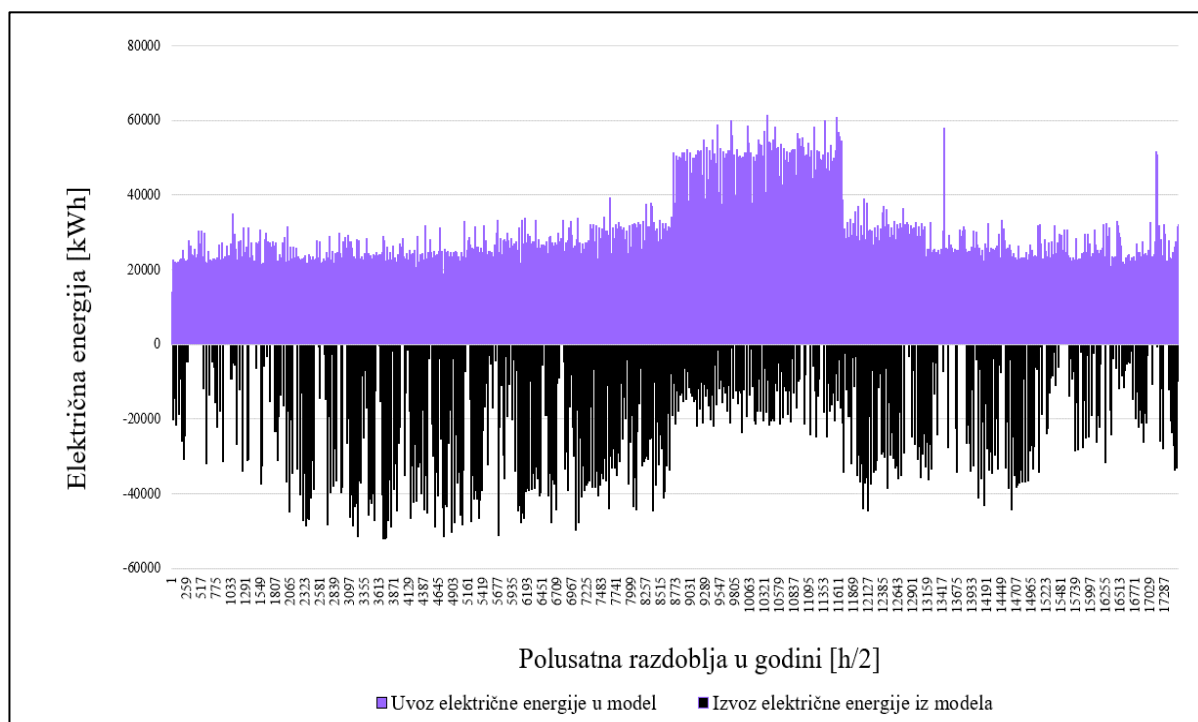
Calliope je nakon pokretanja modela stavio prioritet na određene tehnologije i uklonio druge zbog neodređenih minimalnih kapaciteta, a njihove veće cijene investicije i održavanja. Solarna energija pokazuje najveći potencijal u tom smislu i bilježi konstantan pad cijene kWh iz godine u godinu. Kad bi cijena energije iz solarnih tehnologija bila veća, Calliope bi uključio i druge tehnologije opskrbe u rješenje. U potpunosti je dakle izostavljen kapacitet vjetroelektrana, krovnih solarnih panela i spalionice smeća, a preostale su dvije solarne elektrane, Batomalj na otoku Krku i Orlec na otoku Cresu, obje kapaciteta 80 MW. Kapaciteti dizalica topline koje rade na podzemnu vodu su također izostavljeni na svim lokacijama zbog većih financijskih troškova u odnosu na dizalice topline koje rade na zrak. Kapaciteti svih baterija dostigli su postavljeno ograničenje od 4000 kW/8000 kWh. Postizanje zadanog maksimuma po tom pitanju govori o korištenju veće količine proizvedene energije s odmakom i uzimanje u obzir nesrazmjera trenutne potrošnje i trenutne potražnje za električnom energijom.



Slika 19. Grafički prikaz proizvodnje i potrošnje energije iz različitih izvora iz sučelja Calliope-a



Slika 20. Uvoz i izvoz električne energije u model EnergyPLAN-a

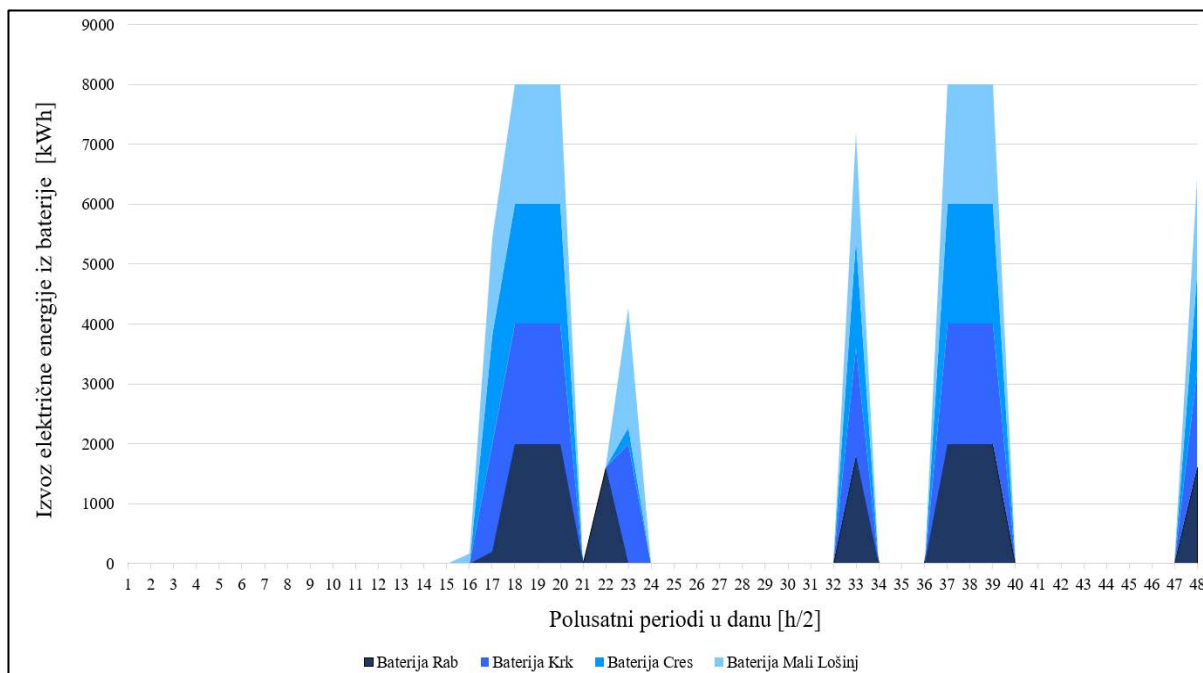


Slika 21. Uvoz i izvoz električne energije u model Calliope-a

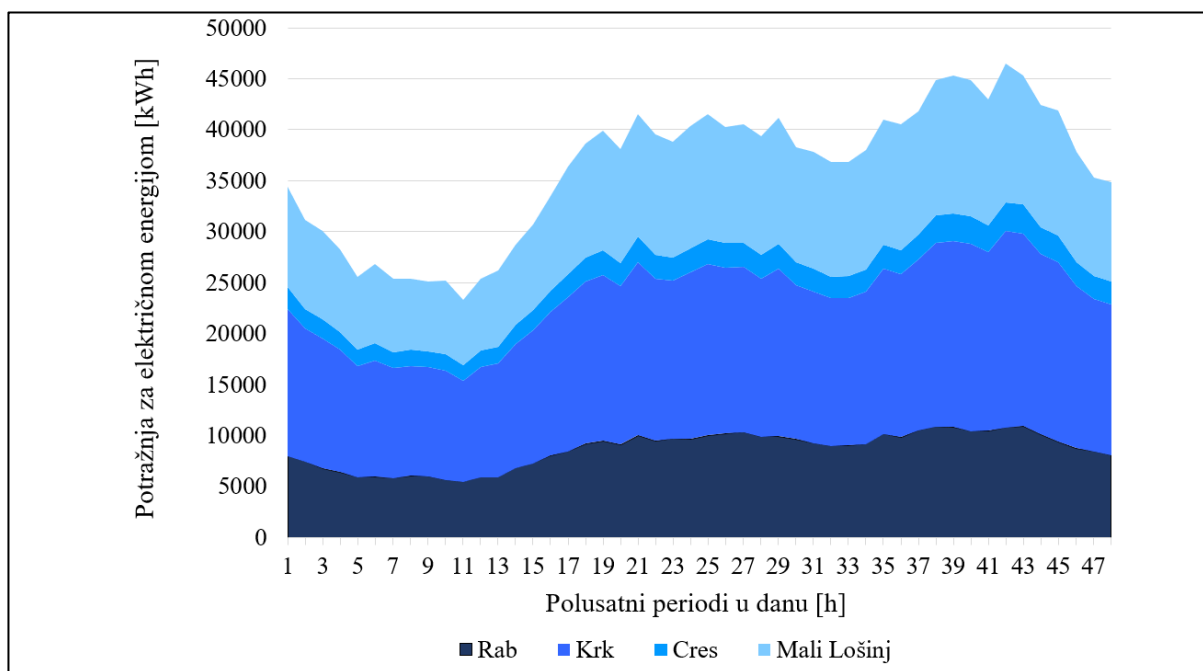
Nakon dobivanja kapaciteta u Calliope-u, isti su kapaciteti korišteni za stvaranje modela u EnergyPLAN-u. Kako EnergyPLAN ne razlikuje više lokacija unutar jednog modela, trafostanice su modelirane kao zbroj kapaciteta tri trafostanice iz modela Calliope-a (240 MW). Iako su modelirani fiksni kapaciteti trafostanica, Calliope je na temelju troškova prijenosa energije dalekovodima isključio uvoz iz trafostanica na lokacijama Krasica (Melina) i Crikvenica, pa se sav uvoz energija odvija preko trafostanice Rab.

Već rezultati uvoza i izvoza energije iz modela pokazuju različitosti oba alata za energetske planiranje. U EnergyPLAN-u je značajno manji iznos izvoza električne energije i puno je veća ovisnost o uvozu energije iz trafostanica. U oba alata uvoz se povećava s potrošnjom energije i doseže maksimum u ljetnim mjesecima. Izvoz uvelike prati ponašanje litij-ionskog baterijskog sustava. Kod EnergyPLAN-a se izvozi manja količina energije i rjeđe se puni i prazni baterijski sustav, dok je kod Calliope-a suprotno. Do takvog stanja dolazi zbog toga što je Calliope alat koji svoj rad temelji na optimizacijskom algoritmu i takav model radi više arbitražu na tržištu. Baterijski sustav kod EnergyPLAN-a je promjenjiviji kroz godinu (slika 28.) u usporedbi s jednolikim ponašanjem baterijskog sustava u Calliope-u. Čak i u

karakterističnim tjednim periodima Calliope pokazuje veću baterijsku aktivnost. Tijekom ljetnog perioda baterijski sustav EnergyPLAN-a biva neaktivan zbog značajnijeg povećanja potražnje energije usmjeravajući energiju iz obnovljivih izvora direktno prema potrošačima. Prednost modeliranja u Calliope-u je ta što je moguće uključiti više lokacija u model, kao na slikama 22. i 23. gdje su površinama prikazani detaljni iznosi izvoza električne energije iz baterije te iznosi lokalne potražnje za električnom energijom.

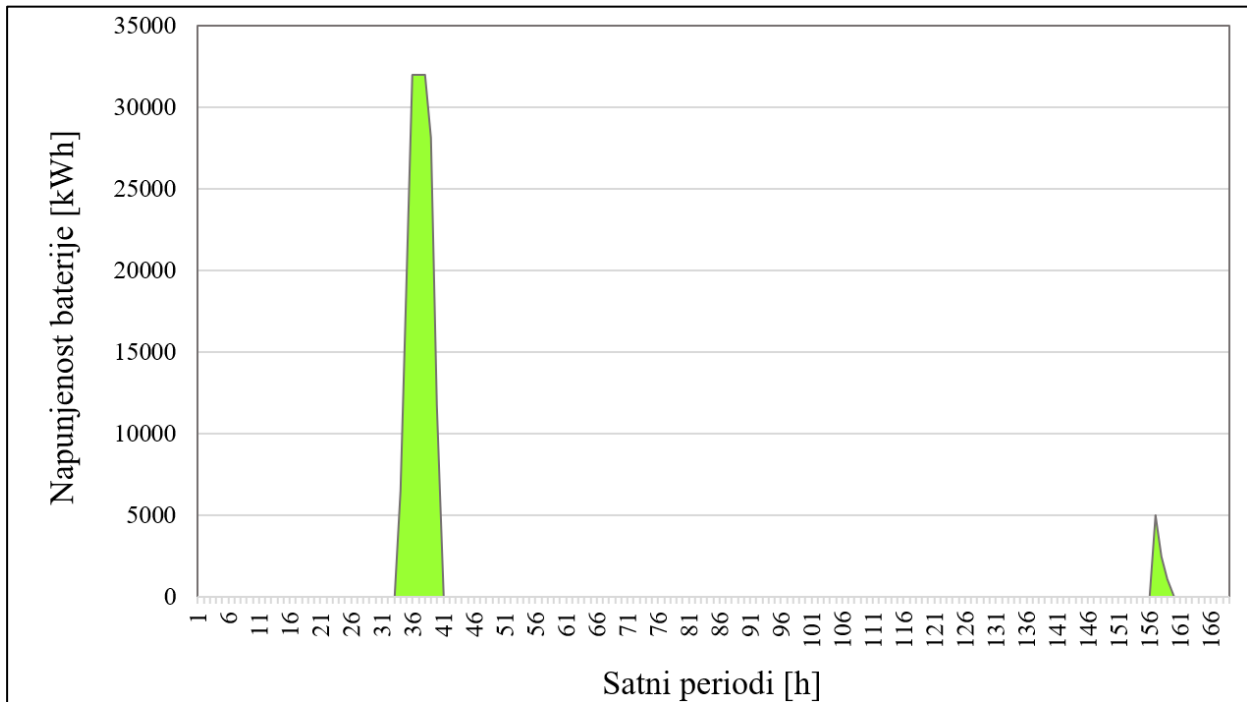


Slika 22. Potrošnja energije iz baterijskog sustava u Calliopeu za karakteristični ljetni dan



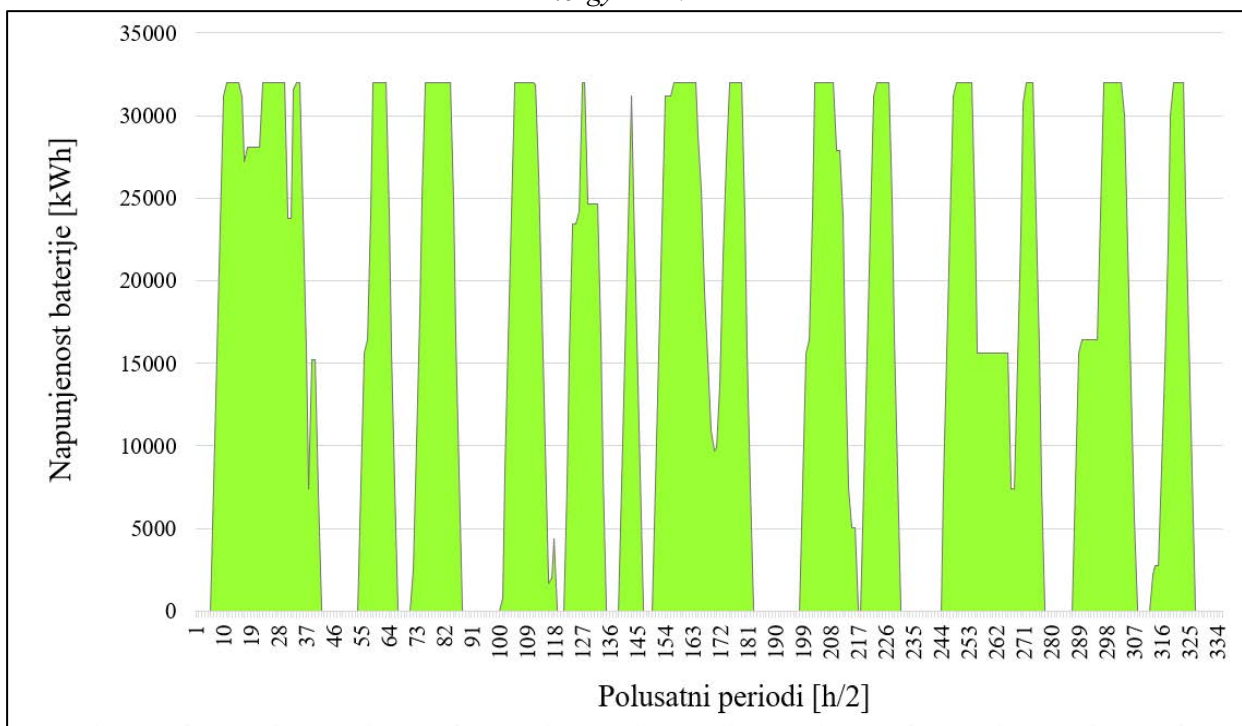
Slika 23. Potražnja za električnom energijom za karakteristični ljetni dan

Na slici 22. vidi se i analogija između pražnjenja baterijskog sustava sa uobičajenim dnevnim razdobljima povećane potražnje za električnom energijom (slika 23.). Baterija se prazni u jutarnjim i večernjim satima te time rasterećuje potrebu za uvozom energije iz trafostanica.



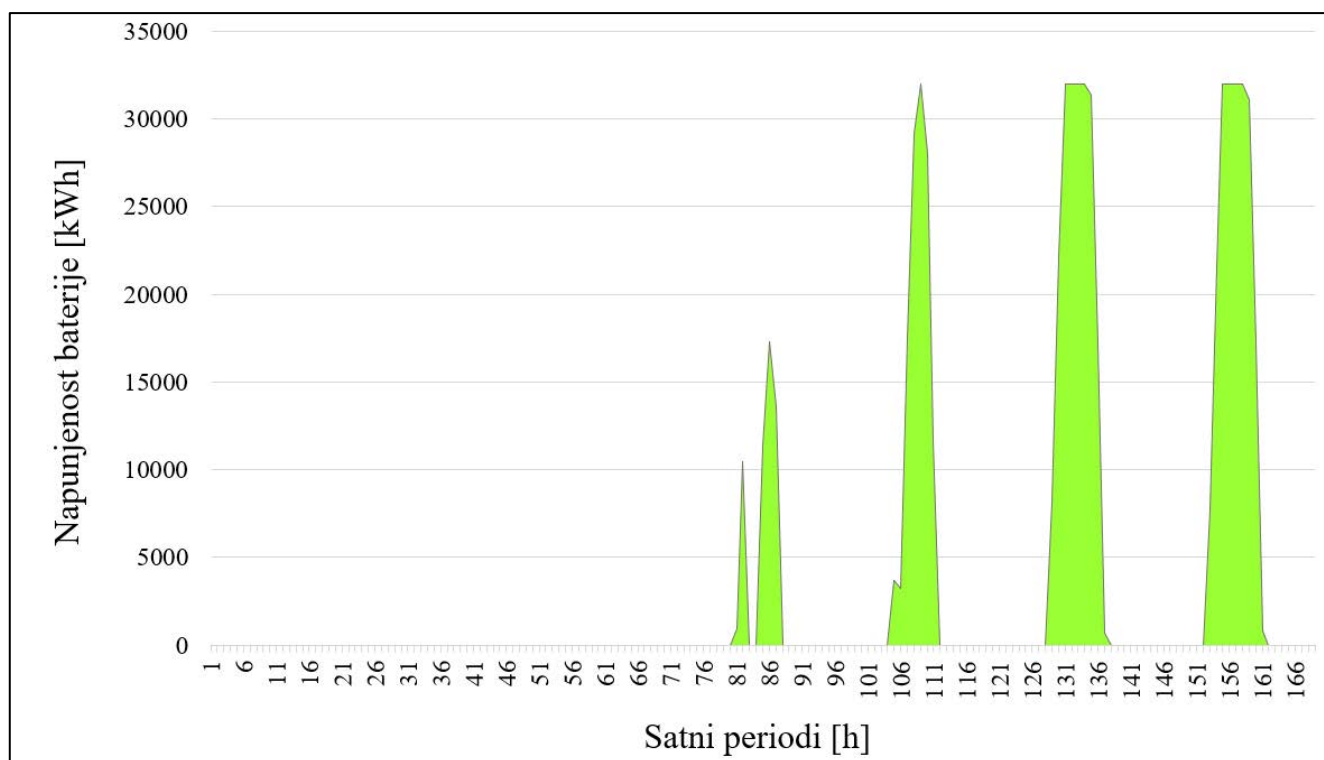
Slika 24. Napunjenost baterijskog sustava u karakterističnom zimskog tjednom periodu -

EnergyPLAN

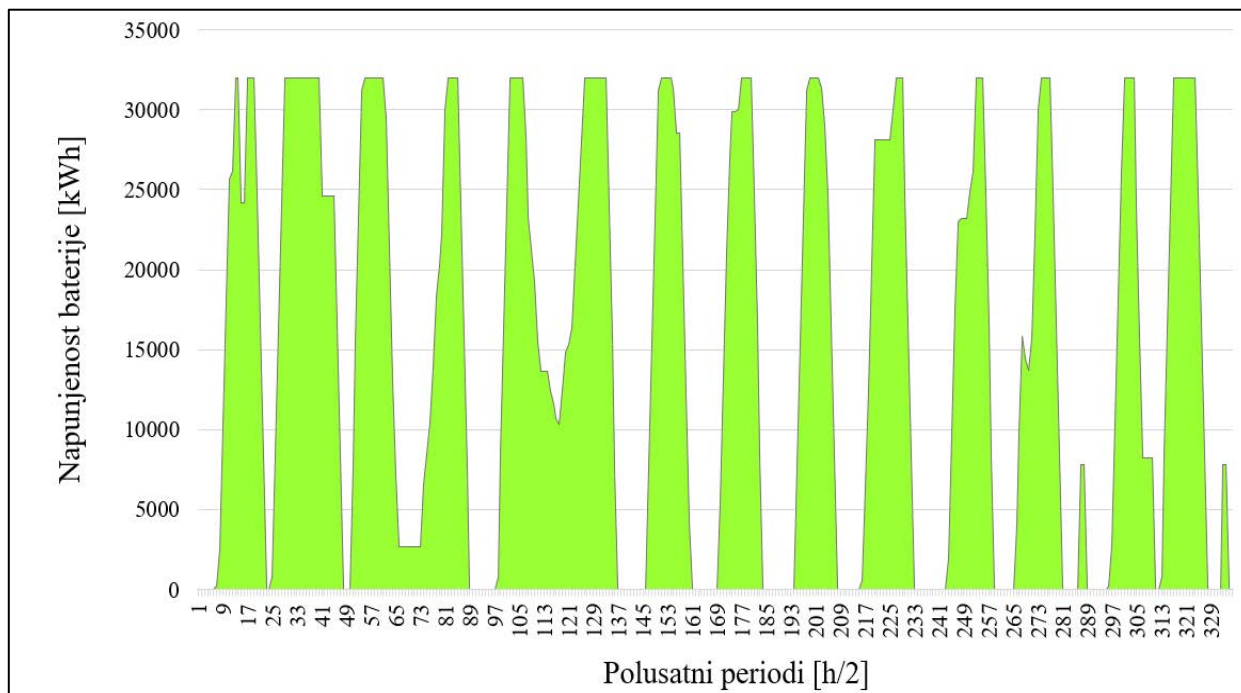


Slika 25. Napunjenost baterijskog sustava u karakterističnom zimskog tjednom periodu - Calliope

U zimskom tjednom periodu baterijski sustav EnergyPLAN-a je ispražnjen s izuzetkom jednog ciklusa punjenja i neposrednog pražnjenja ukupnog vremena 8 sati, dok je u Calliope-u vidljiva svakodnevna aktivnost punjenja i pražnjenja. Baterijski sustav Calliope-a dulje skladišti energiju prije pražnjenja i u četiri navrata pokazuje tendenciju zaustavljanja izvoza energije i pokretanje ponovnog punjenja. Baterijski sustav u oba alata za energetske planiranje ima trajanje ciklusa od potpunog punjenja do potpunog pražnjenja oko 10 sati. Ovakvo ponašanje baterijskog sustava u Calliope-u smanjilo bi se redukcijom tehnologija obnovljivih izvora energije. Kapacitet svake baterije iznosi dopušteni maksimum od 8000 kWh što je direktna posljedica velikog kapaciteta solarnih elektrana. U EnergyPLAN-u bi baterijski spremnik postao aktivniji s ograničavanjem izvoza energije iz obnovljivih izvora izvan modela.

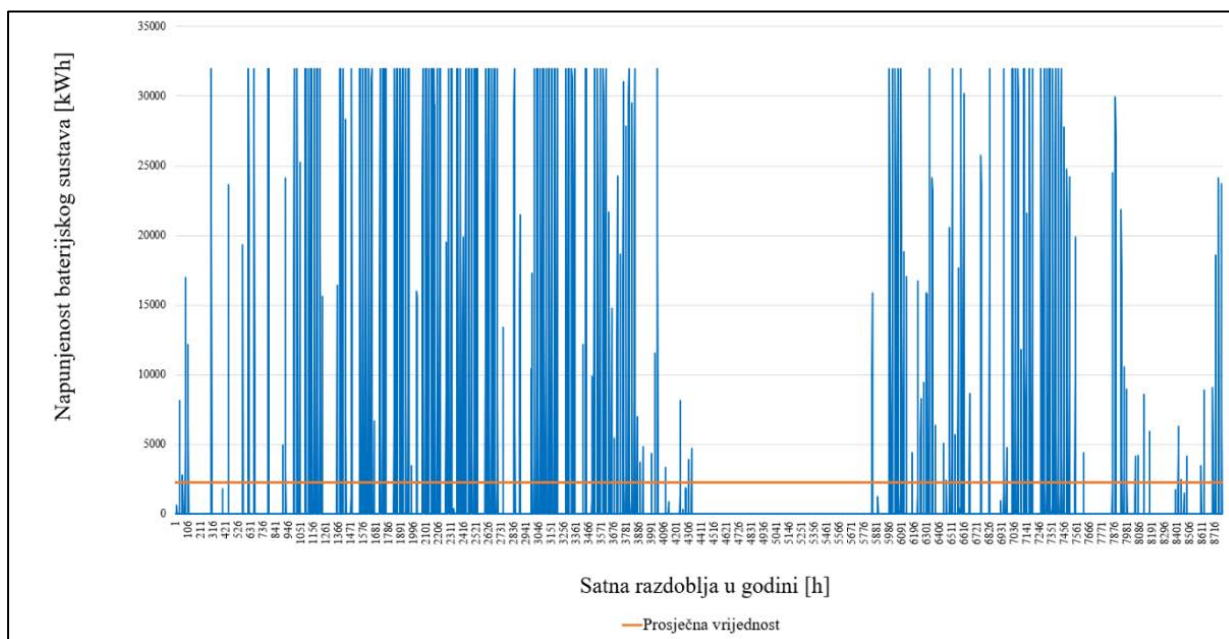


Slika 26. Napunjenost baterijskog sustava u karakterističnom proljetnom tjednom periodu - EnergyPLAN



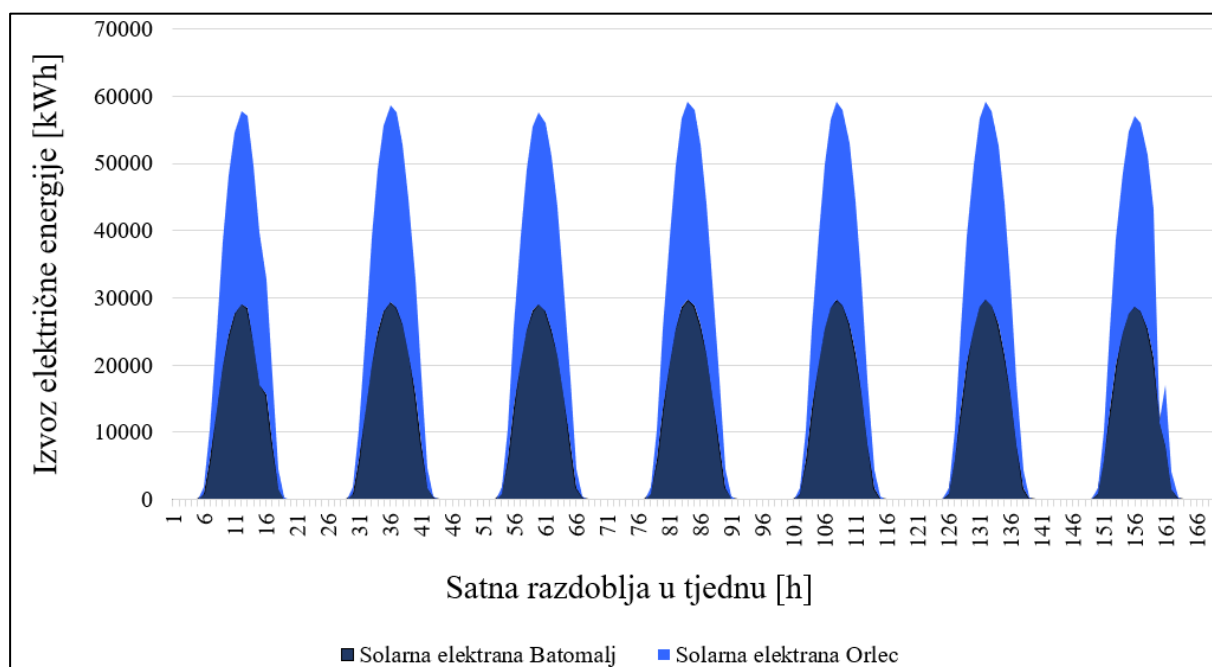
Slika 27. Napunjenost baterijskog sustava u karakterističnom proljetnom tjednom periodu - Calliope

U karakterističnom proljetnom tjednom periodu EnergyPLAN povećava učestalost punjenja i pražnjenja baterijskog sustava (slika 26.), a Calliope zadržava karakteristično ponašanje kao u prethodnom zimskom periodu (slika 27.). Nadalje, proučavajući ljetni tjedni period u EnergyPLAN-u, vidljivo je izuzeće baterijskog sustava u srpnju i kolovozu (slika 28.), dok je u Calliope-u karakteristika svakodnevnog punjenja u pražnjenja i dalje konstantna pojava. EnergyPLAN energiju proizvedenu iz obnovljivih izvora prioritetno izvozi izvan modela, dok Calliope koristi tu energiju za punjenje baterijskog sustava. Razlog tomu je što je Calliope stvara optimizacijski, a EnergyPLAN simulacijski model.

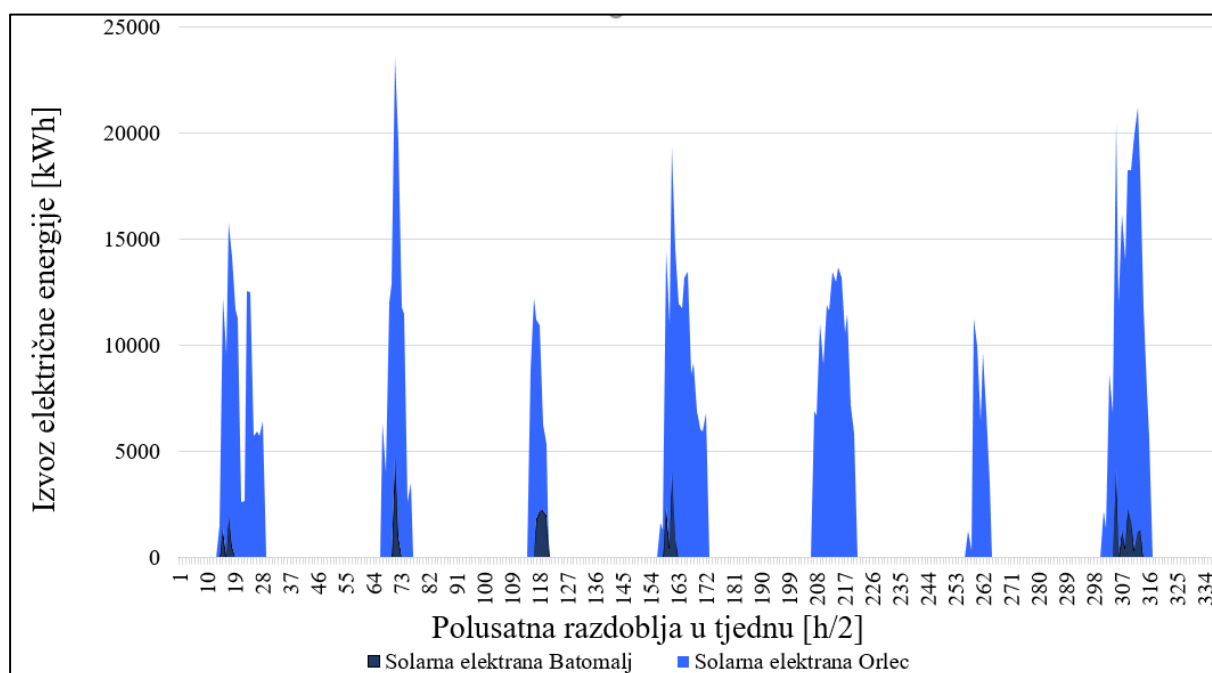


Slika 28. Napunjenost baterijskog sustava godišnje u EnergyPLAN-u

EnergyPLAN svaki dan izvozi jednak iznos električne energije iz obje solarne elektrane (slika 31.), dok Calliope daje prednost izvozu električne energije iz solarne elektrane Orlec, udaljenije te s višestruko manje naseljenog otoka (slika 32.). Obje solarne elektrane su istog kapaciteta 80 000 kW sa sličnim satnim distribucijama pa je uzrok većem izvozu manja potražnja na lokaciji. Calliope također pokazuje i trostruko manji izvoz energije iz solarnih elektrana od EnergyPLAN-a što se slaže s češćim punjenjem baterijskog spremnika u Calliope alatu.

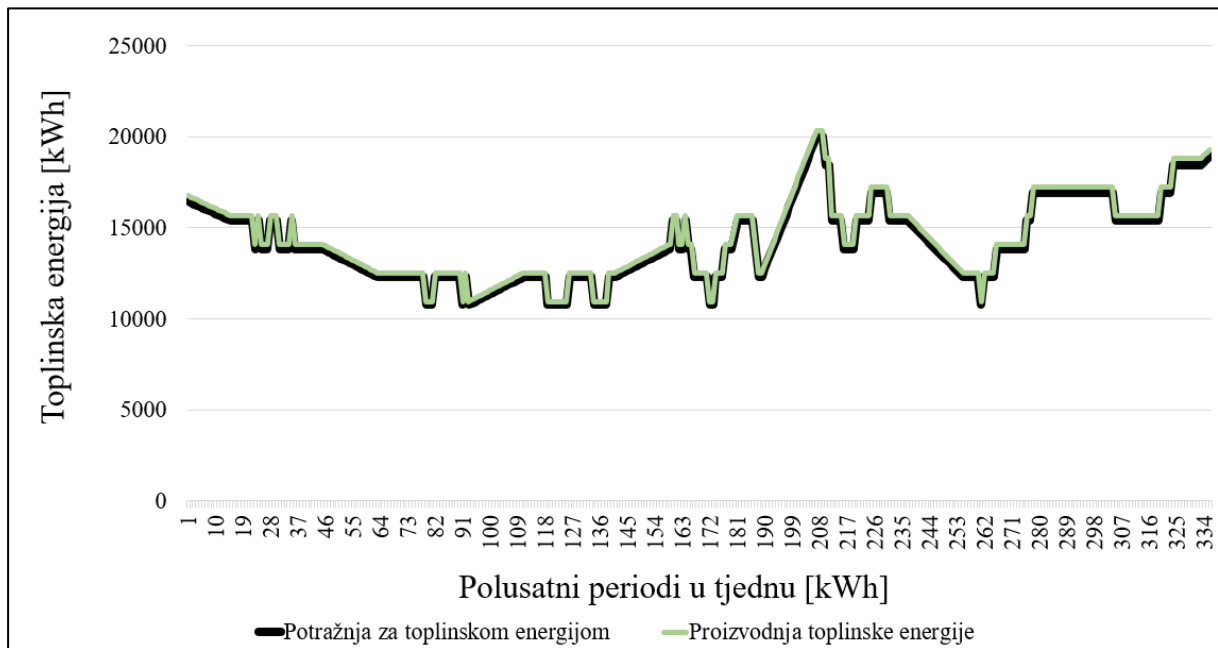


Slika 29. Izvoz električne energije solarne Elektrane Orlec i Batomalj tijekom karakterističnog ljetnog tjedna - EnergyPLAN



Slika 30.29 Izvoz električne energije solarne Elektrane Orlec i Batomalj tijekom karakterističnog ljetnog tjedna - Calliope

Raspodjela proizvodnje energije za ogrjevne i rashladne procese svih dizalica topline prati potražnju za grijanjem i hlađenjem. Za dizalice topline i Calliope (slika 33.) i EnergyPLAN daju jednake rezultate na polusatnoj odnosno satnoj razini što je i očekivano jer je jedna tehnologija dizalica topline pa očekivano proizvodnja topline prati potražnju u oba alata.



Slika 30. Potražnja i proizvodnja toplinske energije tijekom karakterističnog zimskog tjedna - Calliope

5. ZAKLJUČAK

Ključna razlika ova dva alata jest da je Calliope optimizacija, a EnergyPLAN simulacija. Optimzacija će reći što je optimalno za ukupnu društvenu dobrobit, međutim, ne rade i ne instaliraju se uvijek tehnologije optimalne za društvo pa moramo koristiti i simulaciju kako bi analizirali specifične slučajeve. Neracionalno korištenje energije i krivo dimenzioniranje može dovesti do značajnih financijskih troškova kod predimenzioniranja i nezadovoljavanja potreba stanovništva kod poddimenzioniranja. Zato je bitno provoditi analiziranje svih scenarija za najracionalnije iskorištavanje proizvedene energije. Alati za optimizaciju i njihovi matematički modeli temelji su za unaprjeđenje sadašnjih i razvoj budućih energetske sustava. Oba alata detaljno su prikazala raznovrsne informacije o ponašanju baterijskog sustava olakšavajući izazov skladištenja intermitentnih izvora energije. Iz podatkovnih datoteka o izvozu energije iz tehnologija i Calliope i EnergyPLAN dali su detaljnu raspodjelu energetske zahtjevnijih i manje zahtjevnih perioda u više vremenskih razina godišnje. EnergyPLAN ima kvalitetniji edukativni sadržaj, pristupačniji je za korištenje i rad u njemu ne zahtjeva razumijevanje osnove programiranja kao za Calliope. Iako su oba modela stvorena za modeliranje energetske sustava različitih veličina od kućanstava do država, samo Calliope ima mogućnost dodavanja višestrukih lokacija. Time analiza prijenosa energije daje točnije rezultate od EnergyPLAN-a. Calliope ima i detaljniju vremensku razlučivost (polusatnu u odnosu na satnu) i mogućnost dodavanja neograničenog broja tehnologija i znatno većeg broja njihovih karakteristika. Te prednosti čine Calliope prikladnijim alatom za modeliranje detaljnijih modela.

LITERATURA

- [1] Marko Mimica, Dominik F. Dominković, Vedran Kirinčić, Goran Krajačić, Soft-linking of improved spatiotemporal capacity expansion model with a power flow analysis for increased integration of renewable energy sources into interconnected archipelago, Applied Energy, Volume 305, 2022, 117855, ISSN 0306-2619
- [2] <https://www.consilium.europa.eu/hr/policies/climate-change/paris-agreement/>; (pristupljeno 19.9.2021.)
- [3] <https://razvoj.gov.hr/vijesti/europska-komisija-u-studijskom-posjetu-hrvatskim-otocima/3852> ; (pristupljeno 2.2.2021.)
- [4] <https://calliope.readthedocs.io/en/stable/user/introduction.html> (pristupljeno 2.2.2021.)
- [5] <https://www.energyplan.eu/training/introduction/> (pristupljeno 2.2.2021.)
- [6] <https://ens.dk/en/our-services/projections-and-models/technology-data> (pristupljeno 3.2.2021.)
- [7] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Krasica_\(Bakar\)](https://hr.wikipedia.org/wiki/Krasica_(Bakar)) (pristupljeno 1.2.2021.)
- [8] https://www.hops.hr/page-file/t3yCkMyeCD4aJ6gVW3ZX63/temeljni-podaci/HEES_preliminarni_podaci_2012_v2.pdf (pristupljeno 4.9.2021.)
- [9] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Crikvenica> (pristupljeno 4.9.2021.)
- [10] https://www.dzs.hr/Hrv_Eng/publication/2019/04-03-02_01_2019.htm (pristupljeno 5.9.2021.)
- [11] https://www.dzs.hr/hrv/censuses/census2011/results/htm/h01_01_01/h01_01_01_zup08_3638.html (pristupljeno 5.9.2021.)
- [12] <http://www.rab.hr/dokumenti/sjednice-gradskog-vijeca/23-Strategija%20razvoja%20turizma%20Grada%20Raba%20do%202030.%20godine.pdf> (pristupljeno 5.9.2021.)
- [13] <https://www.rab.hr/grad-rab/o-gradu-rabu/opci-podaci> (pristupljeno 5.9.2021.)
- [14] https://www.dzs.hr/hrv_eng/ljetopis/2011/sljh2011.pdf (pristupljeno 5.9.2021.)
- [15] <https://www.baska.hr/ponikve-zagrizele-za-projekt-vjetroelektrana-iznad-baske/> (pristupljeno 5.9.2021.)

- [16] https://www.dzs.hr/hrv/censuses/census2011/results/htm/h01_01_01/h01_01_01_zup08_3638.html (pristupljeno 6.9.2021.)
- [17] <https://www.ekovjesnik.hr/clanak/2998/na-cresu-krece-gradnja-najvece-suncane-elektrane-u-hrvatskoj> (pristupljeno 6.9.2021.)
- [18] <https://www.mali-losinj.hr/2020/gradani/predstavljen-projekt-suncane-elektrane-u-ustrinama/> (pristupljeno 6.9.2021.)
- [19] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Lo%C5%A1inj> (pristupljeno 6.9.2021.)
- [20] <https://www.mali-losinj.hr/2021/vijesti/bspovratnih-106-milijuna-kuna-za-izgradnju-sortirnice/> (pristupljeno 6.9.2021.)
- [21] https://meteo.hr/klima.php?section=klima_hrvatska¶m=k1_8 (pristupljeno 8.9.2021.)