

# Model pristaništa za električne brodove s integriranim obnovljivim izvorima energije i baterijskim spremnikom energije

---

Erdelja, Marko

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:050067>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-03**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Marko Erdelja

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Goran Krajačić

Student:

Marko Erdelja

Zagreb, 2023.

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

*Zahvaljujem se prof. dr. sc. Goranu Krajačiću na mentorstvu te dr. sc. Marku Mimici, mag. ing. na stalnoj dostupnosti, savjetima i pomoći prilikom izrade ovog završnog rada te obitelji i prijateljima na pruženoj podršci.*

*Marko Erdelja*



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

|                                     |        |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu               |        |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum                               | Prilog |
| Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1        |        |
| Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -           |        |

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Marko Erdelja** JMBAG: **0035217670**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Model pristaništa za električne brodove s integriranim obnovljivim izvorima energije i baterijskim spremnikom energije**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Dock model for electric ships with integrated renewable energy sources and battery energy storage**

Opis zadatka:

Donošenjem novih legislativnih uredbi, Europska unija ulaže značajne napore kako bi se što više ubrzala energetska tranzicija kontinenta. Kako bi obnovljivi izvori energije bili što efikasnije integrirani u energetske sustave, razvijaju se inovativna rješenja za integraciju različitih energetskih sektora, ali i elektrifikaciju pojedinih sektora. Iako su rješenja za elektrifikaciju kopnenog transporta u određenoj mjeri već implementirana, rješenja za elektrifikaciju pomorskog transporta su i dalje u značajnoj mjeri u razvoju.

U sklopu ovog završnog rada potrebno je razviti model i analizirati rad pristaništa za električne brodove prema projektu „Dubrovnik – Elafiti Gate“. Pristanište treba uključivati najmanje model električnog broda, krovnog solara i baterijskog spremnika. Analiza će biti provedena u programskom alatu GAMS i trebala bi pokazati kako bi izgledao optimalan rad takvog sustava. Analizu je potrebno provesti s različitim kapacitetima baterijskog sustava.

U okviru završnog rada potrebno je:

1. Opisati tehnologije, matematičke modele i alate korištene u završnom zadatku
2. Analizirati i modelirati proizvodnju iz obnovljivih izvora energije, potrošnju električnog broda na promatranoj lokaciji te modelirati ostale ulazne podatke potrebne za proračun
3. Razviti model promatranog područja u programskom alatu GAMS
4. Provesti analizu dobivenih rezultata na razini jedne godine uključujući najmanje: ukupan trošak rada sustava, stanje napunjenosti baterije u pojedinim vremenskim trenucima te razmjenu energije pristaništa s vanjskim sustavom pod pretpostavkom da je cilj minimizacija troškova rada pristaništa.

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

|                |   |  |
|----------------|---|--|
| Zadatak zadan: | Datum predaje rada:   | Predviđeni datumi obrane:  |
| 30. 11. 2021.  | <b>1. rok:</b> 24. 2. 2022.<br><b>2. rok (izvanredni):</b> 6. 7. 2022.<br><b>3. rok:</b> 22. 9. 2022. | <b>1. rok:</b> 28. 2. – 4. 3. 2022.<br><b>2. rok (izvanredni):</b> 8. 7. 2022.<br><b>3. rok:</b> 26. 9. – 30. 9. 2022. |

Zadatak zadao: **Predsjednik Povjerenstva:**

Izv. prof. dr. sc. Goran Krajačić

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

# SADRŽAJ

|   |     |
|---|-----|
| SADRŽAJ.....  | I   |
| POPIS SLIKA .....   | II  |
| POPIS TABLICA.....  | III |
| POPIS OZNAKA.....   | IV  |
| SAŽETAK.....  | 1   |
| SUMMARY .....   | 2   |
| 1. UVOD .....   | 3   |
| 1.1 Povijest električne energije .....  | 3   |
| 1.2 Komponente pristaništa .....  | 4   |
| 1.2.1 Električni brodovi.....   | 4   |
| 1.2.2 Punjači električnih brodova.....  | 5   |
| 1.2.3 Solarni paneli.....   | 7   |
| 1.2.4 Baterije .....  | 8   |
| 1.2.5 Odziv potrošnje .....   | 9   |
| 2. MODEL.....   | 10  |
| 2.1 Model pristaništa .....   | 10  |
| 2.2 Matematički model .....   | 11  |
| 2.3 Softverski alat GAMS .....  | 14  |
| 2.4 Ulazni podaci .....   | 15  |
| 2.4.1 Izbor lokacije.....   | 15  |
| 2.4.2 Cijena električne energije.....   | 16  |
| 2.4.3 Potražnja električnih brodova .....                                     | 17  |
| 2.4.4 Potražnja luke.....   | 18  |
| 2.4.5 Proizvodnja električne energije na solarima .....                       | 19  |
| 3. ANALIZA RJEŠENJA.....  | 24  |
| 3.1 Scenarij 1 .....  | 24  |
| 3.2 Scenarij 2 – baterija kapaciteta 1000 kWh.....                            | 27  |
| 3.3 Scenarij 3 – instalirana snaga 765 kW .....                               | 28  |
| 3.4 Scenarij 4 – kapacitet baterije 1000 kWh i instalirana snaga 765 kW ..... | 30  |
| 3.5 Scenarij 5 – postizanje nultog troška rada sustava .....                  | 32  |
| 4. ZAKLJUČAK.....   | 34  |
| 5. LITERATURA.....  | 35  |
| PRILOG.....   | 36  |

**POPIS SLIKA**

|  |    |
|--|----|
| Slika 1 Električni trajekt.....  | 4  |
| Slika 2 Punjač ForSea električnog broda [2].....   | 6  |
| Slika 3 Punjači električnih brodova manjih snaga [3].....  | 6  |
| Slika 4 Solarna elektrana na Visu [5].....   | 7  |
| Slika 5 Baterija kapaciteta 500 kWh [6].....   | 9  |
| Slika 6 Shema toka električne energije .....   | 10 |
| Slika 7 Projekt „Dubrovnik – Elafiti gate“ [8].....  | 15 |
| Slika 8 Elafitski otoci i luka Brsečine [8].....   | 16 |
| Slika 9 Cijena električne energije kroz cijelu godinu [€/kWh] .....  | 16 |
| Slika 10 Godišnje opterećenje brodskih punjača [kW] .....  | 18 |
| Slika 11 Godišnje opterećenje pristaništa.....   | 18 |
| Slika 12 Ulazni podaci za PVGIS [11].....  | 20 |
| Slika 13 Geografska lokacija u PVGIS-u [11] .....  | 21 |
| Slika 14 Ukupna godišnja i mjesečna proizvodnja el, energije u PVGIS-u [kWh].....                                      | 22 |
| Slika 15 Godišnja raspodjela snage solarnih panela u svakom trenutku [kW].....   | 23 |
| Slika 16 Snaga Punjača 1, 2 i 3 [kW].....  | 25 |
| Slika 17 Godišnji uvoz i izvoz snage pristaništa [kW].....   | 26 |
| Slika 18 Godišnji uvoz i izvoz snage pristaništa s kapacitetom baterije 1000 kWh [kW].....                             | 27 |
| Slika 19 Godišnje snage uvoza i izvoza pristaništa s kapacitetom baterije 500 kWh i instalirane snage 765 kW [kW]..... | 29 |
| Slika 20 Razlika uvoza i izvoza Scenarija 1 i 3 u periodu od tri dana [kW].....  | 30 |
| Slika 21 Godišnje snage uvoza i izvoza pristaništa instalirane snage 765 kW i kapacitetom baterije 500 kWh [kW].....   | 31 |
| Slika 22 Razlika uvoza i izvoza Scenarija 3 i 4 u periodu od tri dana [kW] .....                                       | 31 |
| Slika 23 Godišnje snage uvoza i izvoza pristaništa s kOIE = 2.32 i kapacitetom baterije 500 kWh [kW] .....             | 32 |

**POPIS TABLICA**

|   |    |
|---|----|
| Tablica 1 Godišnji troškovi rada, uvoz i izvoz Scenarija 1..... | 24 |
| Tablica 2 Godišnji troškovi rada, uvoz i izvoz Scenarija 2..... | 26 |
| Tablica 3 Godišnji troškovi rada, uvoz i izvoz Scenarija 3..... | 27 |
| Tablica 4 Godišnji troškovi rada, uvoz i izvoz Scenarija 4..... | 29 |
| Tablica5 Godišnji troškovi rada, uvoz i izvoz Scenarija 5.....  | 30 |



**POPIS OZNAKA**

| OZNAKA        | MJERNA JEDINICA | OPIS   |
|---------------|-----------------|--|
| $T_{uk}$      | €               | Ukupan trošak sustava                                      |
| $P_{imp}(t)$  | kW              | Uvozna snaga u svakom trenutku t                           |
| $P_{eksp}(t)$ | kW              | Izvozna snaga u svakom trenutku t                          |
| $\tau$        | h               | Vremenski korak od jednog sata                             |
| $C(t)$        | €/kWh           | Cijena električne energije                                 |
| t             | h               | vrijeme  |
| $P_c(t)$      | kW              | Snaga potrebna za punjenje u svakom trenutku t             |
| $P_d(t)$      | kW              | Snaga potrebna za pražnjenje u svakom trenutku t           |
| $S(t)$        | kW              | Snaga solarnih panela u trenutku t                         |
| $k_{OIE}$     |                 | Koeficijent veličine obnovljivih izvora energije           |
| $D_{brod}(t)$ | kW              | Potražnja za električnom energijom broda u svakom trenutku |
| $D_{luka}(t)$ | kW              | Potražnja za električnom energijom luke u svakom trenutku  |
| $D_r(t)$      | kW              | Odziv potrošnje u svakom trenutku                          |
| $D_{rr}(t)$   | kW              | Povrat odziva potrošnje u svakom trenutku                  |
| $y(t)$        |                 | Binarna varijabla  |
| $z(t)$        |                 | Binarna varijabla  |
| $SOC(t)$      | kWh             | Stanje napunjenosti baterije u svakom trenutku             |
| $SOC_{max}$   | kWh             | Maksimalno stanje napunjenosti baterije                    |
| $x_{p1}(t)$   | kW              | Snaga punjača 1  |
| $x_{p2}(t)$   | kW              | Snaga punjača 2  |
| $x_{p3}(t)$   | kW              | Snaga punjača 3  |
| $P_p$         | kW              | Vršna snaga solarnih panela                                |
| A             | m <sup>2</sup>  | Površina solarnih panela                                   |
| $\varepsilon$ | %               | iskoristivost solarnih panela                              |

## SAŽETAK

Elektrifikacija različitih sektora, poput sektora transporta, jedan je od ključnih elemenata energetske tranzicije. Ona se odnosi na prijelaz s korištenja fosilnih goriva na proizvodnju energije iz obnovljivih izvora energije poput sunčeve na solarnim panelima, iskorištavanjem hidroenergije i energije vjetera, energije valova, plime i oseke i dr. Također, elektrifikacija uključuje i zamjenu fosilnih goriva u sektorima koji su trenutno najveći zagađivači, poput prometa. Električni prijevoz, kao što su električni automobili i autobusi, već su dostupni, a sada se pojavljuju i električni brodovi koji se mogu koristiti za prijevoz ljudi i tereta na moru. U ovome je radu analiziran rad jednog pristaništa električnih brodova koji bi prevozio putnike od brodske luke Brsečine blizu Dubrovnika do Elafitskog otočja. Brodovi se pune na električnim punionicama, a električnu energiju opskrbljuju solarni paneli i elektroenergetska mreža. Razvijen je model pristaništa koji se sastoji od baterije, punjača, brodova i solarnih panela. Matematički model opisuje ponašanje sustava, koji se uz ulazne podatke cijena električne energije, proizvodnje električne energije i potražnje potrošača, unosi u matematički alat GAMS koji proračunava optimalan pogon sustava s ciljem ostvarivanja minimalnog troška pogona. Analiza osjetljivosti je provedena s obzirom na promjene ulaznih parametara poput kapaciteta baterijskog spremnika i količine solarnih panela koji proizvode električnu energiju.

Ključne riječi: energetska tranzicija, električni brodovi, proizvodnja električne energije, baterija, solarni paneli

## SUMMARY

Electrification of different sectors, such as transport, is one of key elements of energy transition. It refers to the transition from the use of fossil fuels to the production of energy from renewable sources such as solar energy through solar panels, harnessing hydropower and wind energy, wave energy, tidal energy, etc. Additionally, electrification involves replacing fossil fuels in sectors that are currently the largest polluters, such as transportation. Electric transportation, such as electric cars and buses, are already available, and now electric boats are emerging that can be used for passenger and cargo transport on the sea. This paper analyzes the operation of an electric boat port that would transport passengers from the Brsečine port near Dubrovnik to the Elafiti Islands. The boats are charged at charging stations, and electrical energy is supplied by solar panels and power grid. A port model was developed consisting of a battery, chargers, boats and solar panels. The mathematical model describes the behaviour of the system that takes input data such as the price of electricity, electricity production, and consumer demand, and inputs them into the mathematical tool GAMS, which calculates the optimal operation of the system with the aim of achieving minimal operating costs. Sensitivity analysis was conducted with regard to changes in input parameters such as capacity of the battery storage system and the quantity of solar panels that produce electricity.

Key words: energy transition, electrical boats, electrical energy production, batteries, solar panels

# 1. UVOD

## 1.1 Povijest električne energije

Električna energija koristi se već stoljećima. Od prvih izuma znanstvenika Nikole Tesle i Thomasa Edisona do električnih automobila Elona Muska i električnog hiperautomobila Mate Rimca, čovječanstvo je pokazalo svoje sposobnosti razvijanja tehnologija koje koriste električnu energiju.

Prvi zapisi o promatranju elektriciteta i magnetizma nalazimo u spisima engleskoga znanstvenika Williama Gilberta početkom 16. stoljeća [1]. No sve do kraja 19. stoljeća ta se teorijska zapažanja nisu pretvorila u praktički izvor energije. Prva hidroelektrana napravljena je 1882. godine u Appletonu u Wisconsinu, jednoj od saveznih država Sjedinjenih Američkih Država. Kinetička energija rijeke Fox pretvarala se u električnu koja je dalje distribuirana u domove, poslovne objekte i uličnu rasvjetu.

Usljedilo je veliko proširenje industrije proizvodnje električne energije, a s time i do izuma radija, televizora, telefona i sličnih električnih aparata. Kako se tehnologija nastavljala razvijati, rasla je i potražnja za električnom energijom što je dovelo do gradnje novih elektrana kao i razvoja same distribucije energije. Daljnji rast potražnje potaknuo je inženjere da osmisle kako povećati iskoristivosti dostupnih tehnologija proizvodnje električne energije te kreiranju potpuno novih tehnologija koje bi koristile druge izvore energije kao što su vjetar i sunčevo zračenje te nuklearna energija.

Donošenjem novih legislativa Europska unija želi ubrzati energetska tranziciju ka obnovljivim izvorima energije, stoga se nove ideje elektrifikacije kontinenta obnovljivim izvorima sve više provode u djelo. To uključuje i prometnu infrastrukturu koja se od svojih početaka promijenila zbog njene sve veće primjene. Parne lokomotive su među prvim prijevoznim sredstvima bile zamijenjene u svoje električne verzije. Danas na cestama možemo vidjeti sve više električnih automobila i procjenjuje se da će do sredine 21. stoljeća svi novi proizvedeni automobili biti električni. Međutim, pomorski je promet što se tiče elektrifikacije u zaostatku. Iako već postoje brodovi na električni pogon, nisu toliko rašireni.

Električni brodovi koji trenutno plove svjetskim morima većinom su manjih dimenzija te turističkog i ribolovnog značaja dok veliki teretni brodovi zaostaju za novijom tehnologijom. U

daljnem tekstu pokazan je primjer jednog pristaništa električnih brodova koji bi služili kao trajekti otočja Elafita u blizini Dubrovnika.

## 1.2 Komponente pristaništa

### 1.2.1 Električni brodovi

Električni brodovi koriste električnu energiju umjesto fosilnih goriva za pogon svojih motora. Oni su obično tiši, ekološki prihvatljiviji i imaju manje troškove održavanja u odnosu na tradicionalne brodove s motorom na fosilna goriva. Električni motori su učinkovitiji od motora s unutarnjim izgaranjem te je cijena električne energije općenito niža od cijene benzina i dizela što električne brodove čini još boljom opcijom pomorskog prometa. Međutim, ograničenje električnih brodova čine njihove baterije koje su još uvijek skuplje i teže od fosilnih goriva, a kapacitet im je ograničen i iznosi od 10-20 kWh za manje brodove do nekoliko stotina kilovatsati (kWh) pa čak i do nekoliko megavatsati (MWh) za velike brodove. Mnogi takvi električni brodovi imaju i dizelske generatore koji služe kao rezerva u slučaju neraspoloživosti baterije. Jedni od najvećih električnih brodova koji se danas koriste, nalaze se u Danskoj i Švedskoj, koji imaju veoma razvijenu elektrifikaciju pomorskog prometa u usporedbi s drugim europskim državama. Na slici 1 prikazan je električni trajekt tvrtke ForSea [2] koji plovi između Helsingboga u Švedskoj i Helsingora u Danskoj.

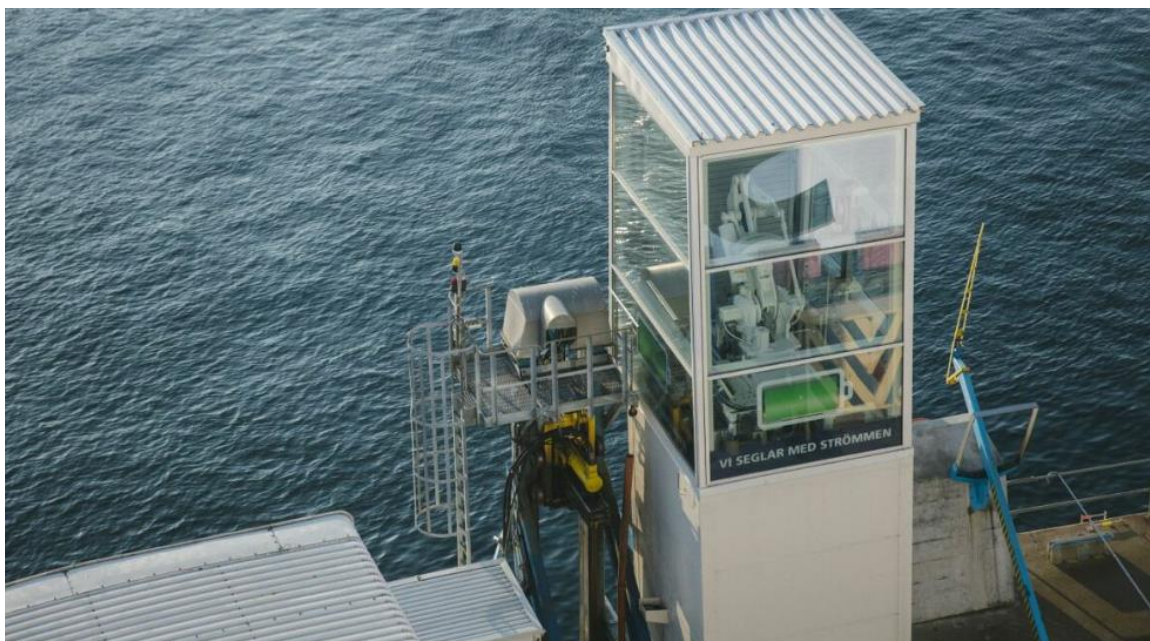


Slika 1 Električni trajekt [2]

Kapacitet baterija tog trajekta iznosi 4100 kWh. Rutom duljine 4 km može prevesti 1250 putnika i 240 automobila, a trajanje jedne vožnje iznosi 20 minuta. Isplovljava svakih 15 minuta i u jednoj godini napravi oko 17 000 vožnji. Također godišnje smanjuje ispuštanje 5 000 tona CO<sub>2</sub> u atmosferu u odnosu na trajekte pogonjeni motorima na unutrašnje izgaranje.

### 1.2.2 Punjači električnih brodova

Punjači električnih brodova su uređaji koji se koriste za punjenje baterija na električnim brodovima. Korištenjem energetske elektronike, punjači pretvaraju električnu energiju iz elektroenergetske mreže u električnu energiju prikladnu za baterijsku pohranu. Postoje različite vrste punjača s različitim snagama i karakteristikama. Određeni punjači su dizajnirani za brzo punjenje baterija, dok su drugi dizajnirani za sporije punjenje kako bi se baterije punile na održiviji način. Većina električnih punjača ima snagu između 100 i 500 kW, no postoje i oni sa snagom do 5 MW. Punjači moraju biti što većih snaga kako bi brodovi što manje vremena stajali u pristaništima te tako ostvarili veći broj prevezenih putnika. Mnogi punjači većih brodova su automatizirani, pogotovo oni koji pune trajekte. To znači da kada pristanu u luku, odmah može započeti punjenje bez ljudske intervencije što dodatno povećava efikasnost punjenja. Punjači u pristaništima moraju biti izrađeni od materijala koji su otporni na koroziju budući da su instalirani u priobalnom području gdje mogu doći u kontakt sa nagrizajućom slanom vodom. Punjači velikih snaga su i velikih dimenzija, pogotovo ako su i sami brodovi velikih dimenzija, dosežu visine do nekoliko metara te njihova instalacija ovisi o položaju broda na pristaništu i položaja utičnice za priključivanje električnog punjača. Također, zbog svoje veće mase, moraju biti dodatno učvršćeni i uzemljeni u pristaništu. Visoki iznosi snaga znače i visoku vrijednost jakosti struje koja prolazi električnim vodovima punjača, stoga se izabiru vodovi većih poprečnih presjeka, a izvedba priključenja punjača većih snaga se tada vrši na srednjem naponu. Punjač koji puni spomenuti električni brod ForSea tvrtke [2] ima snagu 6 MW. Brod se između putovanja puni desetak minuta i to je dovoljno da pokrije potrošnju električnog broda koja iznosi 1175 kWh za jedno putovanje. Na slici 2 [2] prikazan je spomenuti punjač koji je na višoj naponskoj razini, a na slici 3 [3] prikazani su električni punjači manjih snaga na nižoj naponskoj razini.



*Slika 2 Punjač ForSea električnog broda [2]*



*Slika 3 Punjači električnih brodova manjih snaga [3]*



### 1.2.3 Solarni paneli

Solarni paneli koriste sunčevu energiju za proizvodnju električne energije. Sastoje se od više manjih fotonaponskih članaka koji su zajedno spojeni u modul. Svaki članak sadrži poluvodički materijal (najčešće silicij), koji apsorbira fotone sunčeve svjetlosti i stvara električni napon između dvije elektrode. Kada je solarni panel izložen sunčevoj svjetlosti, proizvodi se jednosmjerna električna struja. Snaga komercijalnih panela obično iznosi od 100 do 500 W, iako se mogu naći i veći. Solarni paneli mogu biti izrađeni od silicija u monokristalnom, polikristalnom i amorfnom obliku te galijeva arsenida i kadmijeva telurida [4]. Najčešće se koriste oni iz monokristalnog i polikristalnog silicija, iako su oni manje iskoristivosti, koja iznosi između 14 i 20%, od primjerice galij arsenidnih solarnih panela iskoristivosti do 30%. Razlog tomu je niža cijena i jednostavnija proizvodnja.

Primjer jedne velike solarne elektrane u Hrvatskoj je ona na otoku Visu. Izgradnjom te elektrane ukupne snage 3.5 MW i površine 5 hektara, godišnje se proizvodi oko 5 milijuna kWh električne energije, dovoljno da pokrije potrošnju 1600 kućanstava [5].



*Slika 4 Solarna elektrana na Visu [5]*



Solarni paneli postali su sve popularniji zbog toga što generiraju čistu i obnovljivu energiju iz sunčeve svjetlosti. Čisti su izvor energije jer ne emitiraju zagađujuće tvari i štetne plinove u okoliš, a osim toga, imaju niske troškove održavanja i dug životni vijek. Ne proizvode buku i primjenjive su u svim dijelovima svijeta. Koriste se u raznim aplikacijama, uključujući stambene i poslovne zgrade, industrijska postrojenja i prijenosne uređaje poput električnih brodova, automobila i mobilnih telefona.

#### 1.2.4 Baterije

Stacionarne baterije su uređaji koji omogućuju skladištenje električne energije za kasniju upotrebu. Velikog su kapaciteta i služe kao pohrana velike količine električne energije koje se proizvode iz obnovljivih izvora, u ovom slučaju solarnih panela. Kapacitet ovisi o njenoj veličini i primjeni. Baterija je potrošna, i kao i svi uređaji, sklona je gubitku svojstava poput maksimalnog kapaciteta. Konstantnim punjenjem i pražnjenjem od 100% do 0%, povećava se rizik od nepoželjnih gubitaka svojstava, stoga se baterije većinom ne pune niti prazne do svojih krajnjih vrijednosti. Baterije imaju visoke efikasnosti od čak 95% i ekološki su prihvatljive jer omogućuju da se manje energije proizvodi iz fosilnih goriva, što dovodi do manjeg emisijskog faktora i smanjenja emisije štetnih plinova u atmosferu. Velike baterije kapaciteta 100 kWh i više sastoje se od više manjih baterija spojenih u jedan sustav. Nekoliko desetaka baterijskih modula spajaju se u baterijske grupe koje svojim spajanjem daju konačni sustav baterije. Ovisno o postotku ispražnjenog kapaciteta u jednom ciklusu rada, baterije se mogu koristiti i do 100 000 ciklusa. Za prosječan broj punjenja i pražnjenja od 15 puta na dan jedne takve baterije koja se upotrebljava kao pohrana električne energije, očekivan vijek trajanja baterije iznosi 18 godina. Slika 5 [6] prikazuje jednu takvu bateriju kapaciteta 500 kWh.



Slika 5 Baterija kapaciteta 500 kWh [6]

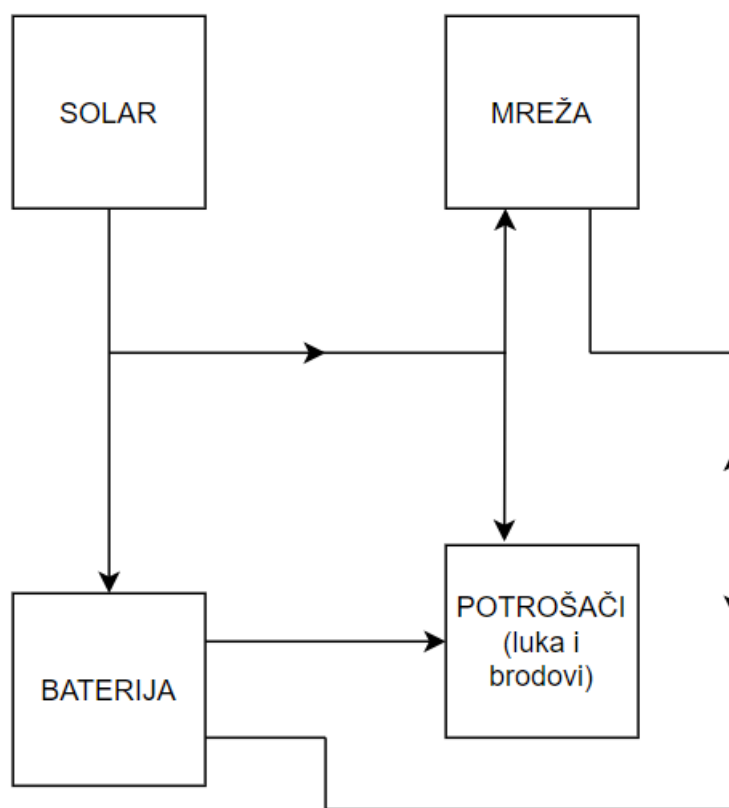
### 1.2.5 Odziv potrošnje

US Department of Energy (DOE) definira odziv potrošnje kao „promjene u potrošnji električne energije kod krajnjih kupaca u odnosu na njihove uobičajene obrasce potrošnje, kao odgovor na promjene u cijeni električne energije tijekom vremena ili na poticajne isplate namijenjene poticanju niže potrošnje električne energije u vrijeme visoke veleprodajne tržišne cijene ili kada je ugrožena pouzdanost sustava“ [7]. On se koristi za balansiranje ponude i potražnje električne energije na tržištu. Kako bi se rasteretilo opterećenje mreže, proizvođači električne energije nude niže cijene ili poticajne isplate, što rezultira boljim ishodom i za proizvođača i za potrošača električne energije. U ovome modelu, električni brodovi i pristanište određuju potražnju za električnom energijom. Odziv potrošnje uzima u obzir promjenu cijene električne energije na tržištu i u određenom trenutku, kada je to povoljno, povećava ili smanjuje potražnju za električnom energijom. Povrat odziva potrošnje svu promjenu u ukupnoj potražnji električne energije, koju je odziv potrošnje uzrokovao, mora neutralizirati kako bi ukupna potražnja električne energije ostala nepromijenjena.

## 2. MODEL

### 2.1 Model pristaništa

Pristanište električnih brodova modelirano je s ciljem smanjenja troškova rada pristaništa, ali i smanjenja negativnog utjecaja na okoliš, budući da električni brodovi ne emitiraju štetne plinove. Osim toga, postavljanjem solarnih panela za proizvodnju električne energije prilikom punjenja brodova, smanjuje se potreba za korištenjem fosilnih goriva. Pojednostavljeni prikaz promatranog modela dan je na slici 6.



Slika 6 Shema toka električne energije

Punjenje električnih brodova provodi se na punionicama s električnim punjačima različitih snaga. Kada su solarni paneli u stanju proizvesti dovoljno električne energije, višak se pohranjuje, a kada je potrebno, koristi se za punjenje brodova. Međutim, ako nema dovoljno sunčeve energije, baterija će osigurati dovoljno električne energije za punjenje brodova, čime se osigurava neprekidna opskrba energijom.

U slučaju da se baterija isprazni, električna se energija preuzima iz elektroenergetske mreže. S druge strane, ako ne postoji trenutna potražnja za električnom energijom, višak energije prodaje se mreži, čime se postiže dodatna ekonomska korist.

Za svrhu izrade modela, odabrani su sljedeći ulazni parametri modela

- punjači električnih brodova - Punjač 1 (150 kW), Punjač 2 (300 kW), Punjač 3 (1000 kW)
- solarni paneli - instalirana vršna snaga 510 kW iskoristivosti 17%
- baterija - kapacitet 500 kWh

## 2.2 Matematički model

Cilj ovog rada je modelirati pristanište električnih brodova tako da se minimiziraju troškovi rada, pri čemu je jedini trošak rada kupnja električne energije na tržištu umanjena za iznos zarade prodajom viška generirane električne energije u mrežu, dok su troškovi održavanja solarnih panela i baterije zanemareni. Ukupan trošak rada sustava za jednu godinu ovisi o razlici energije koja je uvezena i energije koja je izvezena iz sustava i cijeni električne energije na tržištu, stoga slijedi

$$T_{uk} = \sum_{t=1}^{8760} (P_{imp}(t) \cdot \tau - P_{eksp}(t) \cdot \tau) \cdot C(t)$$

gdje  $T_{uk}$  predstavlja ukupan trošak sustava u eurima [€],  $P_{imp}(t)$  uvoznú snagu u svakom trenutku  $t$  u kilovatima [kW],  $P_{eksp}(t)$  izvoznú snagu u kW,  $\tau$  vremenski korak od jednog sata i  $C(t)$  cijenu električne energije u €/kWh, dok  $t$  označava vrijeme u satima.

Sva energija koja ulazi u sustav u svakom trenutku mora biti jednaka energiji koja izlazi iz sustava. Proizvodnja električne energije na solarnim panelima puni bateriju, ona dalje šalje energiju u punjače koji pune brodove. S druge strane, imamo elektroenergetsku mrežu koja pruža električnu energiju kada se ona ne može dobiti iz solara. Također kada solari proizvode više energije nego je to punjačima potrebno, ona se prodaje u mrežu. Jednadžba očuvanja energije glasi

$$P_{imp}(t) + P_d(t) + k_{OIE} \cdot S(t) + D_r(t) = P_{eksp}(t) + P_c(t) + D_{rr}(t) + D_{brod}(t) + D_{luke}(t)$$

gdje su  $P_c(t)$  i  $P_d(t)$  snage potrebne za punjenje i pražnjenje baterije u trenutku  $t$  u kW,  $k_{OIE}$  koeficijent veličine obnovljivih izvora energije, koji promjenom vrijednosti utječe na veličinu instalirane snage solarnih panela,  $S(t)$  snaga proizvedena na solarnim panelima u kW,  $D_{brod}(t)$  i  $D_{luke}(t)$  potražnje snaga brodova i luke u kW te  $D_r(t)$  i  $D_{rr}(t)$  odziv potrošnje i povrat odziva potrošnje. Kako bi se zadovoljila potražnja i potrošnja, iznosi odziva potrošnje i povrata odziva potrošnje moraju u konačnici biti jednake. Također, maksimalna vrijednost odziva potrošnje i povrata odziva potrošnje mora biti unutar zadane vrijednosti, stoga je takav sustav modeliran sljedećim jednadžbama

$$D_r(t) \leq 0.1 \cdot D_{brod}(t) \cdot z(t)$$

$$D_{rr}(t) \leq 0.1 \cdot D_{brod}(t) \cdot (1 - z(t))$$

$$\sum_{t=1}^{8760} D_r(t) = \sum_{t=1}^{8760} D_{rr}(t)$$

gdje  $z(t)$  predstavlja binarnu varijablu koja onemogućava istovremeni rad odziva potrošnje i povrata odziva potrošnje.

Baterija se konstantno puni i prazni proizvodnjom iz solara i punjenjem brodova. Kako bi se mogli analizirati podaci napunjenosti baterije, postavlja se jednadžba

$$SOC(t) = SOC_0|_{t=1} + SOC(t-1)|_{t>1} + 0.95 \cdot P_c(t) \cdot \tau + \frac{P_d(t)}{0.95} \cdot \tau$$

gdje  $SOC(t)$  predstavlja stanje napunjenosti baterije u svakom trenutku  $t$  u kWh,  $SOC_0|_{t=1}$  početno stanje napunjenosti baterije u trenutku  $t=1$ ,  $SOC(t-1)|_{t>1}$  stanje napunjenosti baterije u prijašnjem trenutku u slučaju da je  $t$  veći od 1 te  $P_c(t)$  i  $P_d(t)$  količina energije punjenja i pražnjenja baterije u trenutku  $t$ . Iskoristivost baterije iznosi 95%.

Punjači moraju imati ograničenje koliko mogu napuniti ili isprazniti bateriju u zadanom trenutku iz čega slijedi

$$P_c(t) \cdot \tau \leq 0.5 \cdot SOC_{max} \cdot y(t)$$

$$P_d(t) \cdot \tau \leq 0.5 \cdot SOC_{max} \cdot (1 - y(t))$$

$SOC_{max}$  je maksimalno stanje napunjenosti baterije, odnosno njezin kapacitet, a  $y(t)$  je binarna varijabla koja osigurava da se baterija ne puni i prazni u istom trenutku. Kada bi se baterija mogla puniti i prazniti u jednom trenutku (jednom satu) u većoj mjeri, primjerice 100%, moglo bi doći do smanjenja kapaciteta baterije, a usto bi joj brže rasla temperatura što može dovesti do oštećenja baterije i skraćivanja njenog vijeka trajanja.

Punjači također moraju zadovoljavati energetska bilancu, tj. moraju zadovoljiti potražnju brodova  $i$  odziv potrošnje u svakom zadanom trenutku iz čega slijedi

$$xp_1(t) \cdot \tau + xp_2(t) \cdot \tau + xp_3(t) \cdot \tau = D_{brod}(t) - D_r(t) + D_{rr}(t)$$

pri čemu su  $xp_1(t)$ ,  $xp_2(t)$ , i  $xp_3(t)$  snage punjača u kW.

Kako bi se osiguralo da su sva tri punjača u funkciji tijekom cijele godine, postavljena je jednadžba

$$0.5 \cdot \sum_{t=1}^{8760} xp_3(t) = \sum_{t=1}^{8760} xp_1(t) + \sum_{t=1}^{8760} xp_2(t)$$

## 2.3 Softverski alat GAMS

GAMS (General Algebraic Modeling System) je softverski alat za matematičko modeliranje i optimizaciju. To je jezik za modeliranje i alat koji omogućuje korištenje matematičkih modela za rješavanje različitih vrsta optimizacijskih problema, uključujući linearne i nelinearne programe, prostore, kombinatorne i dinamičke programe, itd.

GAMS je napravljen tako da bude jednostavan za korištenje, a istovremeno moćan i fleksibilan. To omogućuje korisnicima da brzo i učinkovito modeliraju i riješe kompleksne optimizacijske probleme u različitim industrijskim sektorima, kao što su energetika, proizvodnja, zdravstvo i transport.

GAMS ima veliku zbirku modela za rješavanje različitih vrsta optimizacijskih problema kao i sučelje za rad s različitim rješavačima, uključujući linearne i nelinearne rješavače, rješavače za kombinatorne programe i rješavače dinamičkih programa.

GAMS također ima podršku za rad s različitim operacijskim sustavima, uključujući Windows, Linux i macOS, i podržava različite programe za vizualizaciju i analizu rezultata, te ima dobro razvijenu zajednicu korisnika, koja pruža podršku i savjete za korištenje.

Ukratko, GAMS je izuzetno korisno sredstvo za modeliranje i optimizaciju kompleksnih matematičkih modela, a s njegovim jednostavnim sučeljem, širokim rasponom podržanih problema i platformi te dobro razvijenom zajednicom korisnika, on je izvrstan izbor za one koji žele brzo i efikasno riješiti teške optimizacijske probleme.

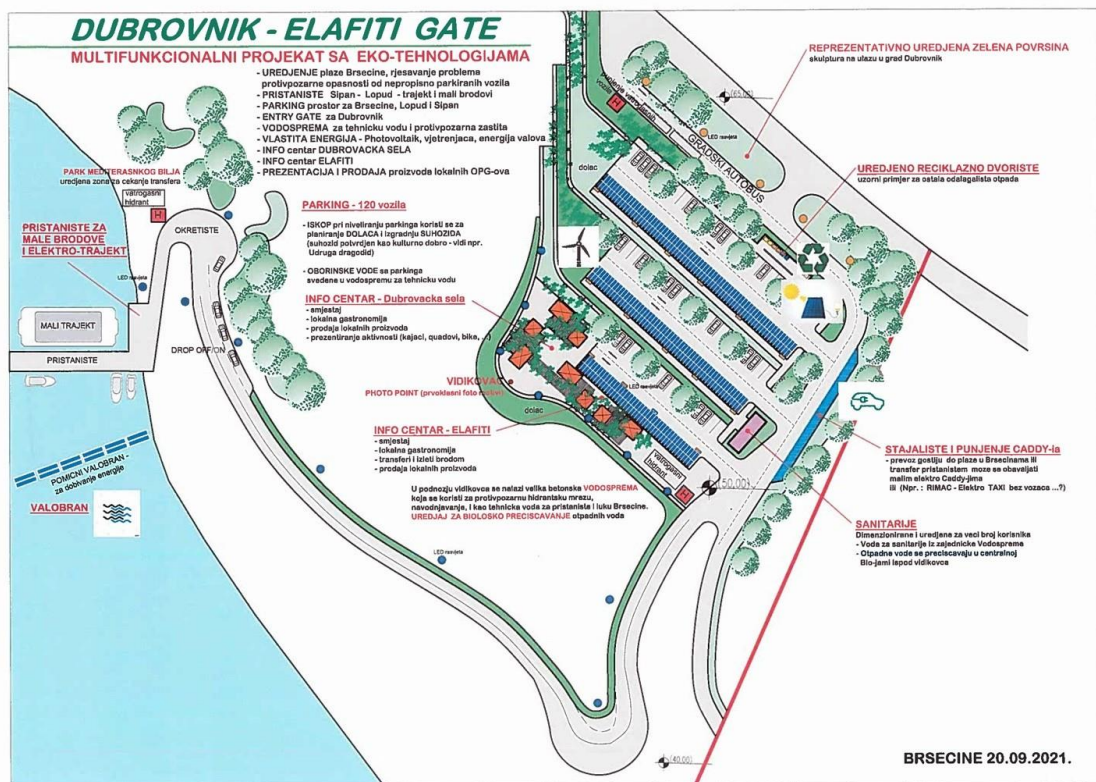
GAMS ima dobru povezanost rada s ostalim popularnim programima poput Excela što znači da se ulazni podaci mogu ispisati u Excel tablice i potom uvesti u GAMS radi postizanja matematičke analize problema.

Zbog svojih izuzetnih karakteristika i jednostavnosti korištenja, GAMS je bio izbor za alat u kojem će se razviti model promatranog problema.

## 2.4 Ulazni podaci

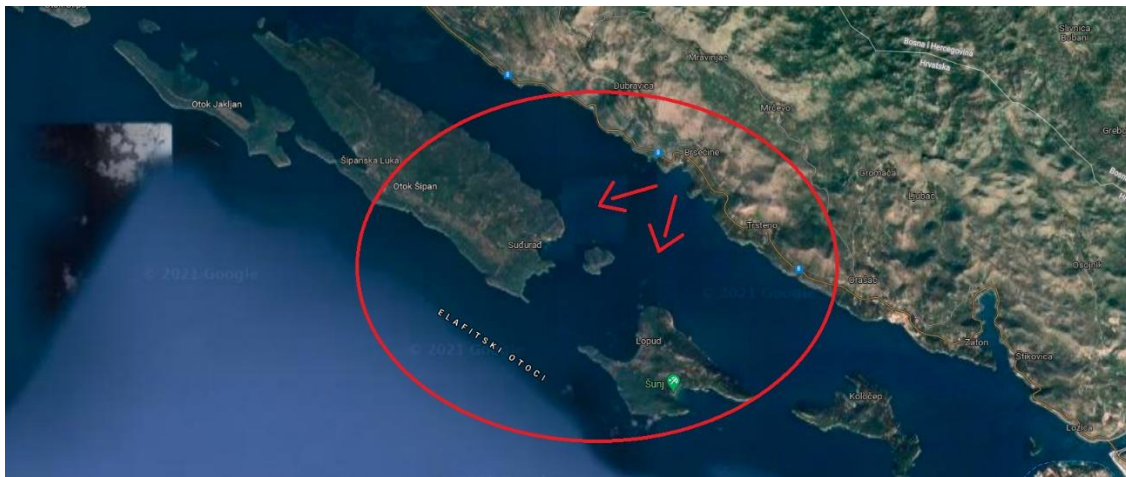
### 2.4.1 Izbor lokacije

Lokacija je ključni faktor u proizvodnji električne energije jer ona ovisi o dostupnosti izvora energije. U slučaju solarnih panela, sunčeva svjetlost je osnovni izvor energije, a visoka prosječna godišnja insolacija ključna je za postizanje visoke proizvodnje električne energije. To znači da je važno da se pristanište smjesti na području koje ima dovoljno sunčeve svjetlosti tijekom cijele godine. Prema projektu „Dubrovnik – Elafiti Gate“, Brsečine su odabrane kao lokacija pristaništa zbog visoke prosječne godišnje insolacije i mogućnosti izgradnje solarnih elektrana u tom području.



Slika 7 Projekt „Dubrovnik – Elafiti gate“ [8]

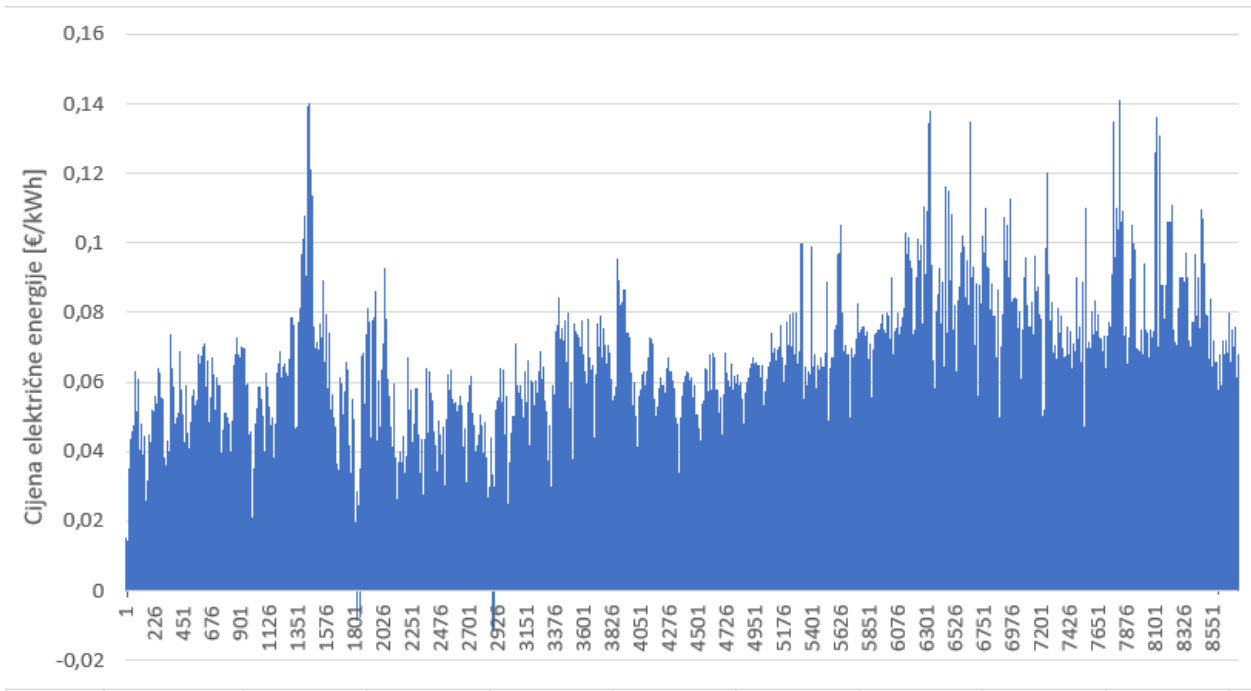




Slika 8 Elafitski otoci i luka Brsečine [8]

### 2.4.2 Cijena električne energije

Hrvatska burza električne energije (CROPEX) nudi podatke o cijeni i proizvodnji električne energije u pojedinim satima, danima čak i godinama. Na internetskoj stranici CROPEX-a [9] mogu se naći arhivirani podaci cijena električne energije za pojedinu godinu. Korišteni su podaci za 2018. godinu. Podaci su ispisani u Excel tablici i sadrže cijene električne energije po svakom satu, točnije 8760 podataka cijena za 1 godinu, a isti su prikazani na slici .



Slika 9 Cijena električne energije kroz cijelu godinu [€/kWh]

### 2.4.3 Potražnja električnih brodova

Električni brodovi kapaciteta 1000 kWh plovili bi Jadranskim morem na području otočja Elafita. Uz prosječnu brzinu od 25 km/h potrošnja baterije iznosi oko 25 kWh/km. Ruta kojom brodovi plove u prosjeku iznosi 6 km. Jedno oplovljivanje stoga traje

$$\frac{6 \text{ km}}{25 \text{ km/h}} = 0.24 \text{ h}$$

Tome se pridodaje vrijeme potrebno za ukrcaj i iskrcaj putnika, odnosno vrijeme punjenja, stoga između dva putovanja prođe 0.5 sata. U tome vremenu baterija pojedinog broda smanjila se za

$$25 \text{ kWh/km} \cdot 6 \text{ km} = 150 \text{ kWh}.$$

Dakle, u prosječnom radnom danu u trajanju od 12 sati, brodovi oplove

$$n = \frac{12 \text{ h}}{0.5 \text{ h}} = 24$$

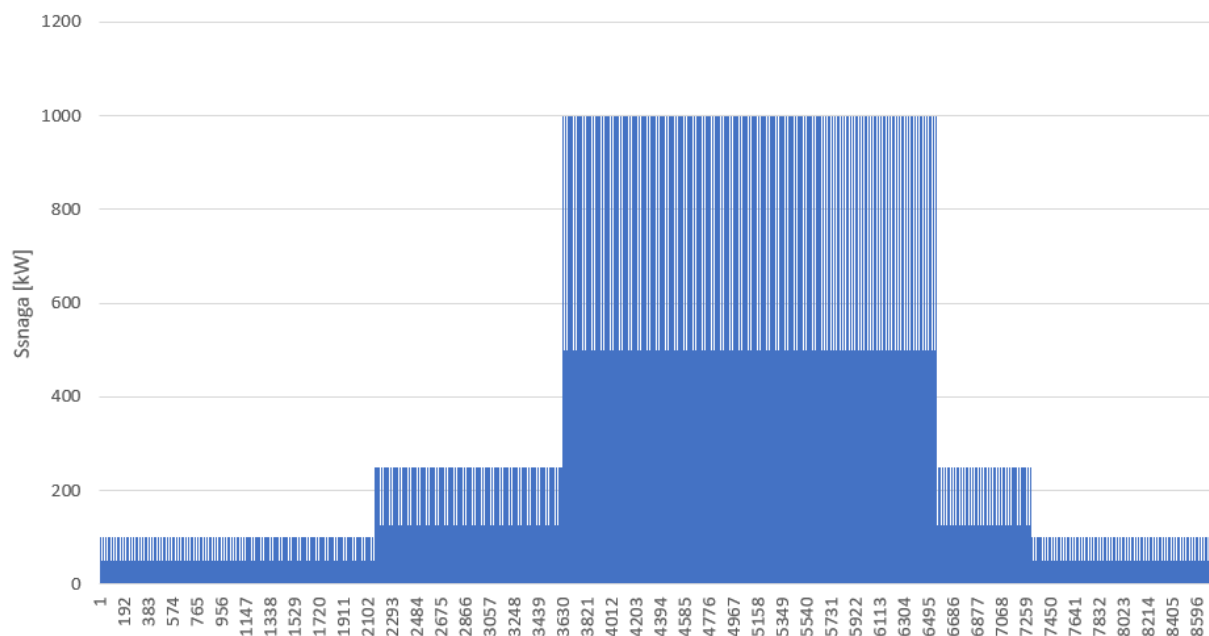
puta, što daje ukupnu dnevnu potrošnju, odnosno potražnju za električnom energijom od

$$150 \text{ kWh} \cdot 24 = 3600 \text{ kWh}.$$

Uz 5 brodova u cirkulaciji, dnevna potražnja električne energije brodova iznosi

$$3600 \text{ kWh} \cdot 5 = 18000 \text{ kWh}.$$

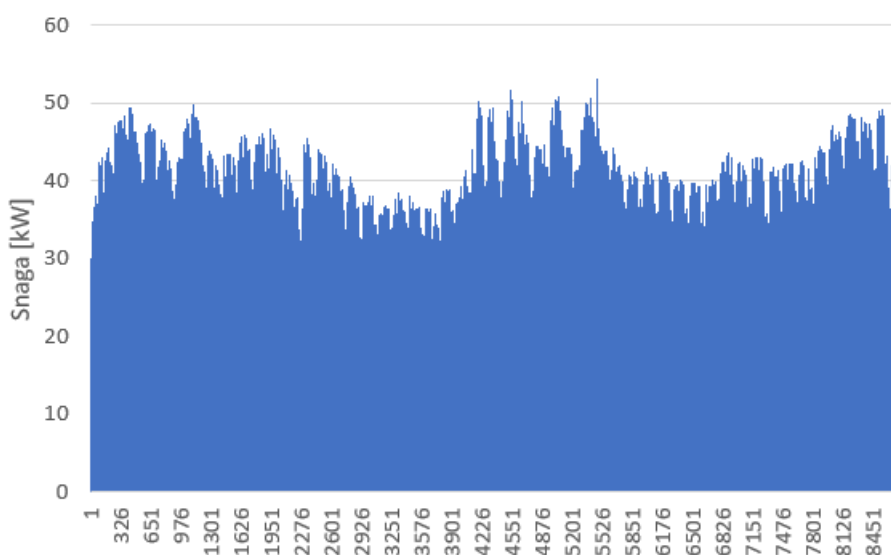
Imajući na umu da će zimi biti puno manja potražnja električne energije brodova zbog manjeg korištenja brodova, te da se brodovi pune na oba pristaništa formira se tablica podataka koja sadrži podatke za svaki sat tokom cijele godine. Na slici 10 prikazana je godišnja potražnja snage električnih brodova.



Slika 10 Godišnje opterećenje brodskih punjača [kW]

#### 2.4.4 Potražnja luke

Brodsko luka također ima svoje troškove električne energije, od osnovnih uređaja i rasvjete do raznih strojeva, ventilacijskih sustava i dr. Zbog nedostatka konkretnih podataka o potrošnji električne energije luke i jednostavnosti modela, opterećenje luke je modelirano sukladno karakterističnim krivuljama dostupnim na stranicama HEP-a [10]. Dobiveni podaci prikazani su na slici 11.



Slika 11 Godišnje opterećenje pristaništa

#### 2.4.5 Proizvodnja električne energije na solarima

Kako bi se došlo do podataka o proizvodnji električne energije iz solarnim panela, korišten je alat PVGIS [11] (Photovoltaic Geographical Information System), kojeg je razvio zajednički istraživački centar Europske komisije (JRC) kako bi pružio informacije o potencijalu solarnih sustava na različitim lokacijama diljem svijeta. Ovaj alat omogućuje korisnicima da pristupe detaljnim informacijama o godišnjoj proizvodnji električne energije iz solarnih sustava te dnevne prosječne jačine sunčevog zračenja unosenjem potrebnih podataka o sustavu poput vršne snage solarnih panela, kutu nagiba i orijentacije panela i geografskog položaja gdje bi bili instalirani solarni paneli te drugih relevantnih podataka.

Predviđena površina za solarnu elektranu u promatranom pristaništu iznosi  $3000 \text{ m}^2$ . Taj je podatak relevantan za izračun vršne snage solarnih panela. Što je veća ta površina, to se više sunčevog zračenja može apsorbirati i pretvoriti u električnu energiju. Za izračun vršne snage solara, polazi se sljedećom jednačbom

$$P_p = 1 \text{ kW/m}^2 \cdot A \cdot \varepsilon$$

gdje je  $P_p$  vršna snaga u kW,  $A$  površina solarnih panela u  $\text{m}^2$  i  $\varepsilon$  iskoristivost solarnih panela. Konstanta  $1 \text{ kW/m}^2$  predstavlja prosječnu vrijednost jačine sunčevog zračenja koja pada na zemlju u uvjetima standardnog testiranja solarnih panela. Unosenjem poznatih podataka površine te iskoristivosti od 17% u gornju jednačbu dobiva se iznos vršne snage

$$P_p = 1 \text{ kW/m}^2 \cdot 3000 \text{ m}^2 \cdot 0.17 = 510 \text{ kW}$$

Kako bi PVGIS dao željene podatke, osim vršne snage treba odabrati lokaciju na kojoj bi se solarni paneli instalirali. Također su bitni azimut i kut nagiba solarnih panela kako bi se maksimalno iskoristila proizvodnja električne energije. Azimut označava kut otklona solara od smjera juga, što znači da ako su solari okrenuti prema istoku, azimut iznosi  $-90^\circ$ , prema jugu  $0^\circ$ , a ako su okrenuti ka zapadu  $90^\circ$ . Ako je poznat jedan od ova dva podataka, PVGIS može drugi podatak optimizirati.

GRID CONNECTED

## PERFORMANCE OF GRID-CONNECTED PV

TRACKING PV

OFF-GRID

MONTHLY DATA

DAILY DATA

HOURLY DATA

TMY

Solar radiation database\* PVGIS-SARAH2

PV technology\* Crystalline silicon

Installed peak PV power [kWp]\* 510

System loss [%]\* 14

**Fixed mounting options**

Mounting position\* Free-standing

Slope [°]\* 35  Optimize slope

Azimuth [°]\* 0  Optimize slope and azimuth

**PV electricity price**

PV system cost (your currency)

Interest [%/year]

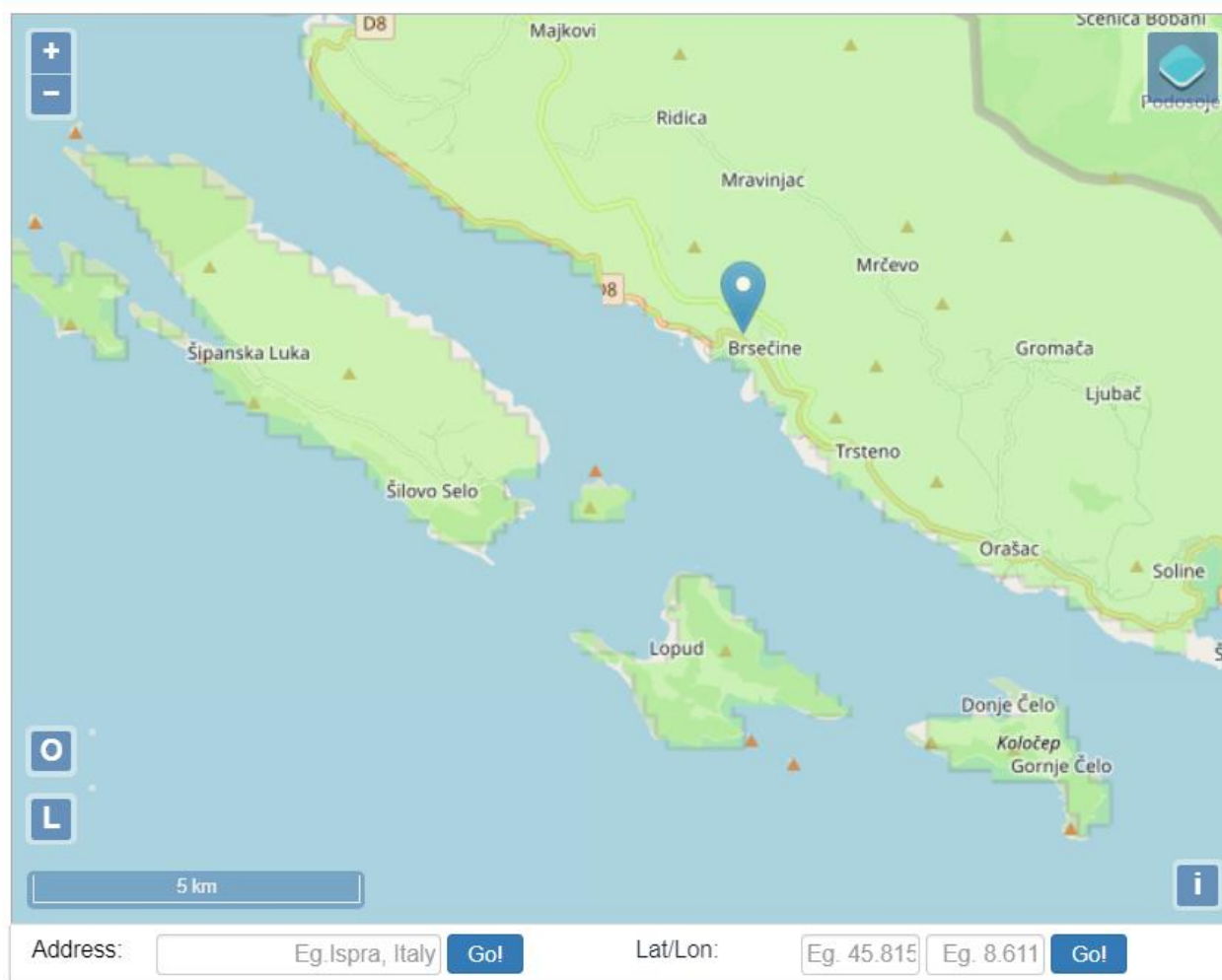
Lifetime [years]

Visualize results

csv

json

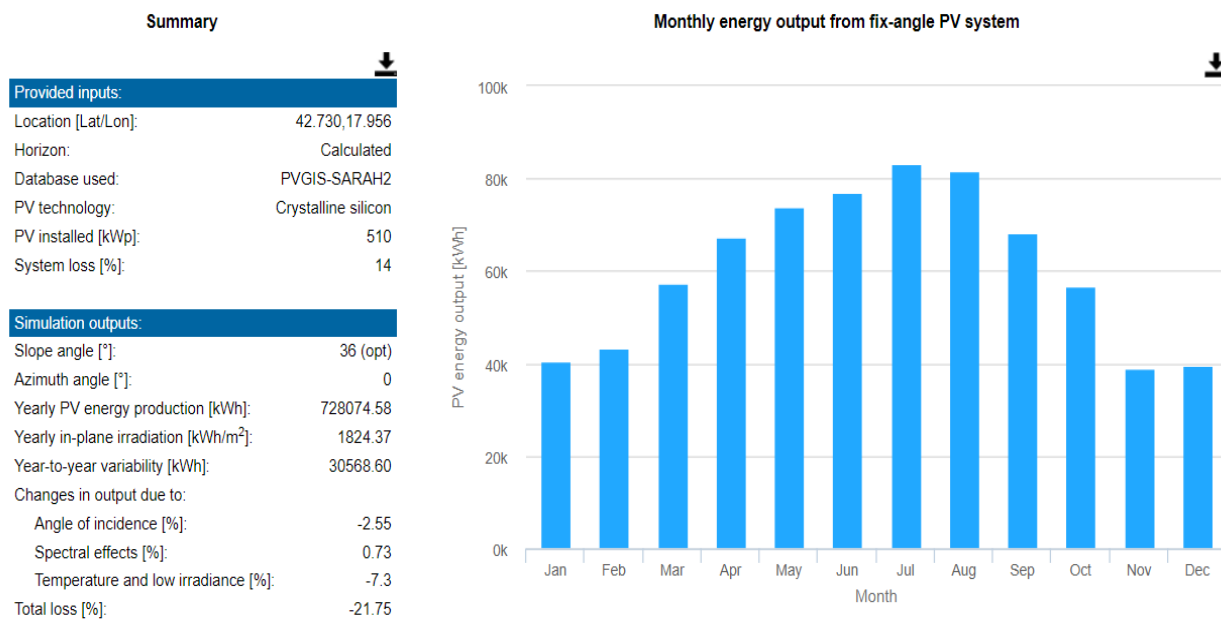
Slika 12 Ulazni podaci za PVGIS [11]



Slika 13 Geografska lokacija u PVGIS-u [11]

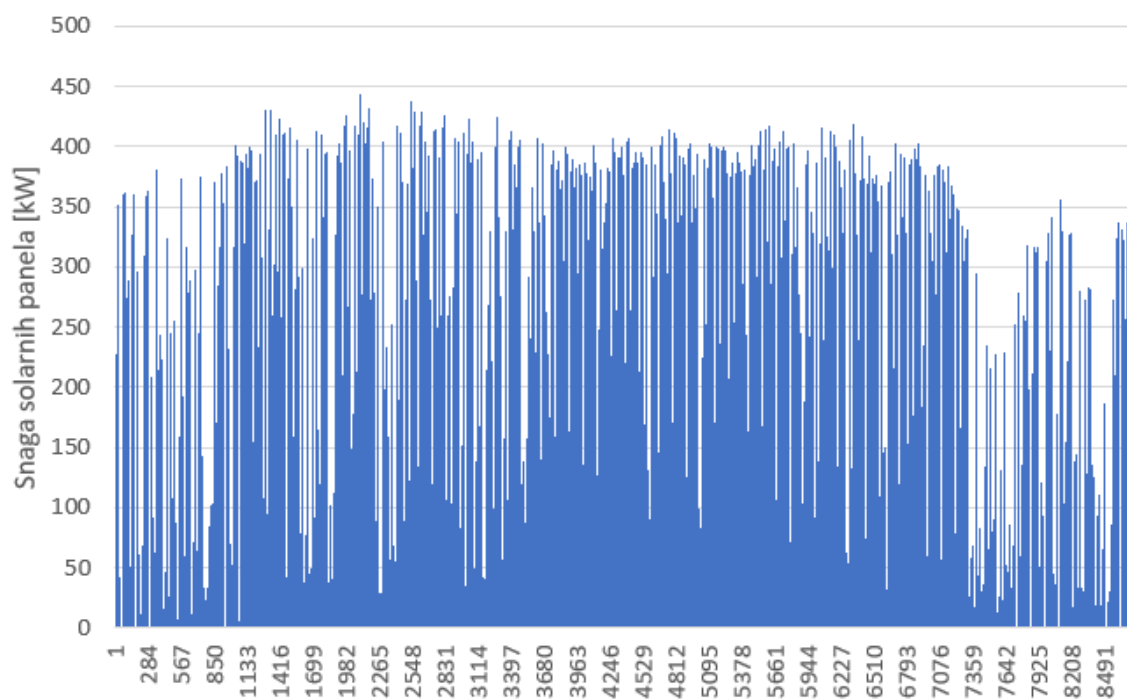
Na slici 12 prikazan je alat PVGIS u kojem su uneseni ulazni podaci. Azimut iznosi  $0^\circ$ , a nagib solarnih panela ostavljen je PVGIS-u da ga optimizira. U PVGIS-u je također vrlo jednostavno odabrati lokaciju na kojoj bi bili instalirani solarni paneli, jednostavno se uveća mapa svijeta i odabere željeno područje, kao što prikazuje slika 13.

Sa svim podacima unesenima u alat, pokrene se analiza i podaci se izbacuju u vizualnom obliku kao što prikazuju slike 14 i 15.



Slika 14 Ukupna godišnja i mjesečna proizvodnja el, energije u PVGIS-u [kWh] [11]

Proizvodnja električne energije se mjesečno mijenja kako se mijenjaju i godišnja doba, odnosno kut upada sunčevih zraka. Najviša proizvodnja je u srpnju i iznosi nešto više od 80 000 kWh, a najniža u prosincu i siječnju gdje je upola manja, oko 40 000 kWh. Ukupna godišnja proizvodnja električne energije dostiže vrijednost od 728 000 kWh. Izračunati optimalni kut nagiba solarnih panela iznosi 36° i ne razlikuje se puno od preporučene prosječne vrijednosti koju predlaže PVGIS prije analize od 35°. Slika 15 prikazuje godišnju raspodjelu snage solarnih panela u svakom trenutku



Slika 15 Godišnja raspodjela snage solarnih panela u svakom trenutku [kW]

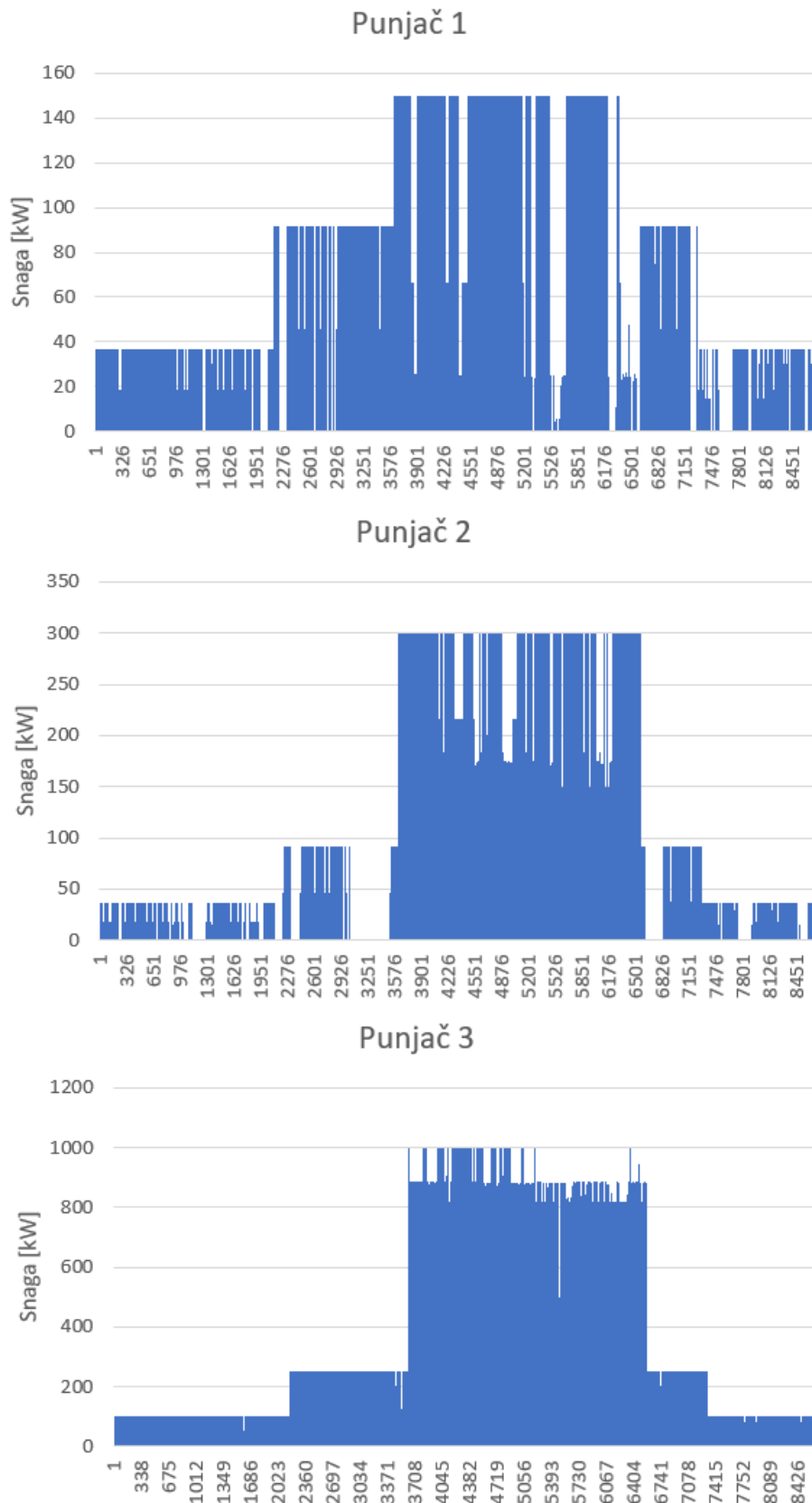


### 3. ANALIZA RJEŠENJA

Izradom pet scenarija prikazat će se rad pristaništa i međusobne razlike njihovih rješenja. Scenarij 1 obuhvaća kapacitet baterije 500 kWh i instaliranu snagu 510 kW. U sljedećem scenariju kapacitet baterije raste na 1000 kWh, dok snaga ostaje ista, a u Scenariju 3 se koeficijent veličine obnovljivih izvora energije  $K_{OIE}$  povećava sa 1 na 1.5, odnosno instalirana snaga solarnih panela iznosi 765 kW, dok baterijski kapacitet ostaje na 500 kWh. U Scenariju 4 mijenjaju se i kapacitet baterije i instalirana snaga, a u Scenariju 5 pokazat će se koliki je potreban iznos instalirane snage da bi se postigao trošak rada pristaništa u iznosu od 0 €.

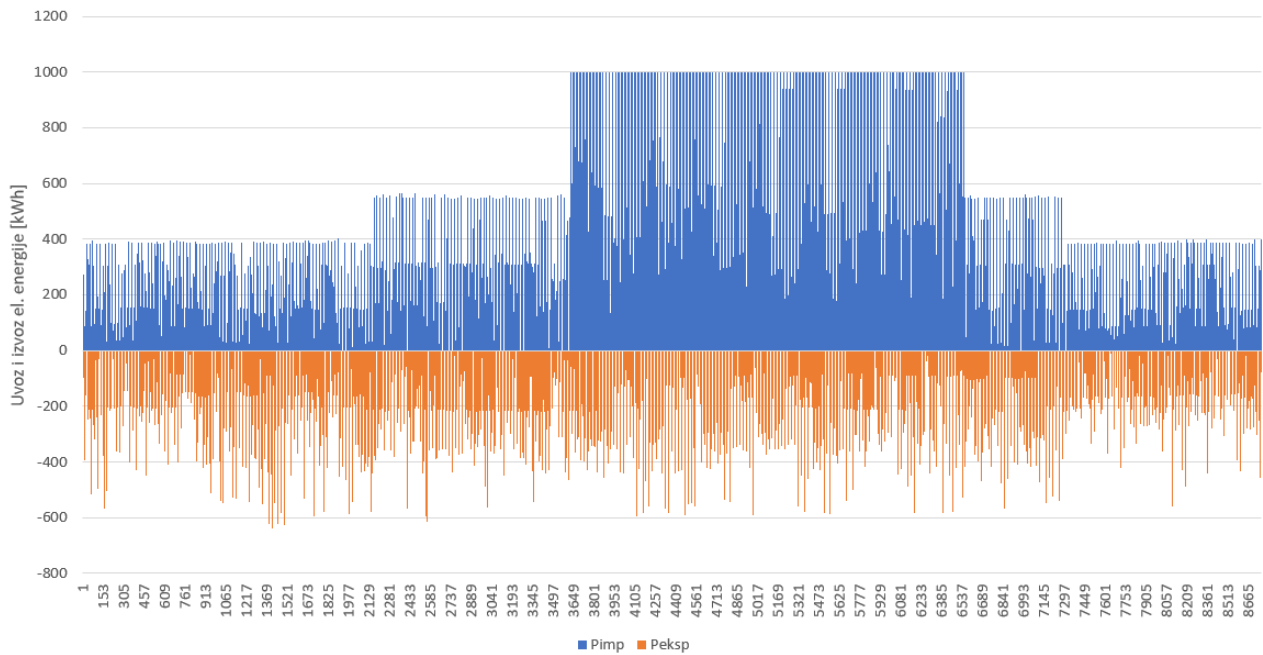
#### 3.1 Scenarij 1

Slika 16 prikazuje snage pojedinih punjača u svakom trenutku u periodu od jedne godine. Grafički prikazi Punjača 1, Punjača 2 i Punjača 3 imaju međusobno sličan oblik. Svi punjači prate krivulju potražnje električnih brodova sa slike 10. Prazne linije na grafovima pokazuju trenutke u kojima su pojedini punjači isključeni ili rade s nižom snagom. U svakom trenutku, ako postoji potražnja brodova za električnom energijom, barem jedan od punjača je uključen i tako se punjači međusobno nadopunjuju kako bi svaki brod bio na vrijeme napunjen.



Slika 16 Snaga Punjača 1, 2 i 3 [kW]

Na slici 17 prikazan je grafički prikaz godišnjeg uvoza i izvoza snage pristaništa brodova. U zimskim mjesecima potražnja brodova je dovoljna mala da višak proizvodnje električne energije na solarima nadomjesti trošak uvoza električne energije iz mreže, stoga se uvoz i izvoz u tom periodu značajno ne razlikuju. Do velike razlike dolazi u ljetnim mjesecima kada je potražnja brodova maksimalna. Prosječna uvozna snaga u ljetnom periodu iznosi 563 kW, dok je izvozna snaga jednaka 56 kW, što znači da je uvozna snaga čak 10 puta veća od izvozne. U zimskom periodu prosječna uvozna snaga je 132 kW, a izvozna 68 kW, odnosno uvozna je snaga dvaput veća od izvozne, što nije toliko izražena razlika kao ljeti.



Slika 17 Godišnji uvoz i izvoz snage pristaništa [kW]

U tablici 1 prikazani su iznosi ukupnog troška pogona sustava kao i ukupne godišnje vrijednosti uvezene i izvezene energije. Pozitivna vrijednost ukupnog troška sustava pokazuje iznos novaca u € koje treba utrošiti na rad sustava u periodu od 1 godine, dok bi negativna vrijednost dala isti iznos zarade u €, što bi bio slučaj da je izvoz električne energije bio veći od uvoza.

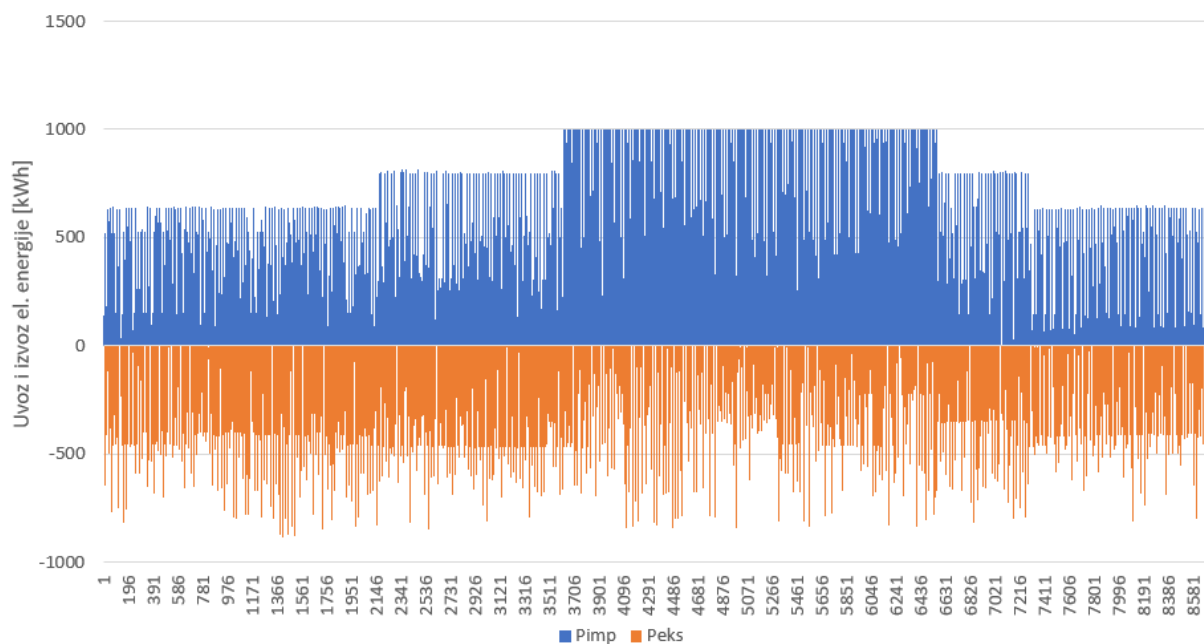
| Trošak rada [€] | Ukupan uvoz električne energije [kWh] | Ukupan izvoz električne energije [kWh] |
|-----------------|---------------------------------------|--|
| 54 484          | 1 804 955                             | 521 832                                |

Tablica 1 Godišnji troškovi rada, uvoz i izvoz Scenarija 1

Kako bi se smanjio uvoz električne energije iz mreže i time smanjio ukupan trošak rada pristaništa, mijenjaju se ulazni parametri modela koji imaju velik utjecaj na količinu proizvedene i pohranjene energije, kao što su kapacitet baterije i proizvodnja električne energije iz solara.

### 3.2 Scenarij 2 – baterija kapaciteta 1000 kWh

Na slici 18 prikazan je graf godišnje uvozne i izvozne snage pristaništa s baterijskim spremnikom od 1000 kWh.



Slika 18 Godišnji uvoz i izvoz snage pristaništa s kapacitetom baterije 1000 kWh [kW]

U ovom slučaju moguće je uočiti razliku uvoza i izvoza modela s baterijskim spremnikom od 1000 kWh u odnosu na model s baterijskim spremnikom kapaciteta 500 kWh. U ljetnom periodu uočava se smanjena razlika između vrijednosti uvoza i izvoza. Prosječna snaga uvoza sada iznosi 597 kW,

a izvoza 252 kW, smanjujući omjer uvoz/izvoz s 10 na svega 2.3. Međutim, u zimskom periodu dogodila se još značajnija promjena. Prosječna snaga izvoza od 293 kW je veća od snage uvoza koja iznosi 183 kW, odnosno sustav u zimskom periodu ostvaruje profit.

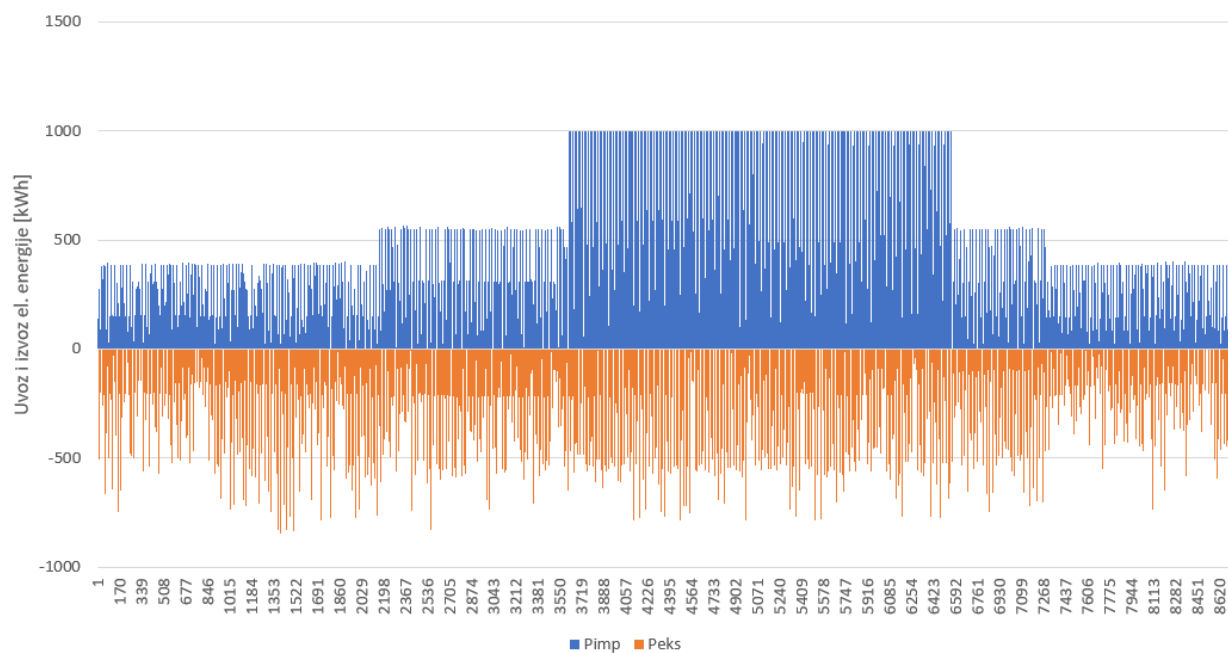
U tablici 2 prikazani su ukupni godišnji trošak sustava te ukupne energije uvoza i izvoza. Ugradnjom većeg baterijskog spremnika, ukupan trošak rada sustava pao je za 9.4%. Ukupan uvoz porastao je za 13.7% što bi samo po sebi povećalo trošak sustava, ali izvoz energije se povećao za 41.8% čineći ovakav model isplativijim.

| Trošak rada [€] | Ukupan uvoz električne energije [kWh] | Ukupan izvoz električne energije [kWh] |
|-----------------|---------------------------------------|--|
| 49 360          | 2 051 282                             | 739 790                                |

Tablica 2 Godišnji troškovi rada, uvoz i izvoz Scenarija 2

### 3.3 Scenarij 3 – instalirana snaga 765 kW

Koeficijent veličine obnovljivih izvora energije odnosi se na broj solarnih panela instaliranih u pristaništu. U ovome slučaju instalirano je 1.5 puta više solara, stoga je i proizvodnja električne energije iz istih 1.5 puta veća, odnosno iznosi 765 kW. U odnosu na Scenarij 1, promjena koeficijenta veličine obnovljivih izvora energije nije znatno promijenila godišnje uvozne snage, no zato je višestruko povećala izvoznju snagu. U ljetnom periodu prosječna snaga izvoza iznosi 284 kW, a u zimskom 256 kW, što daje povećanje od 5 puta ljeti, odnosno 3.7 puta zimi. Slika 19 prikazuje godišnje snage uvoza i izvoza.

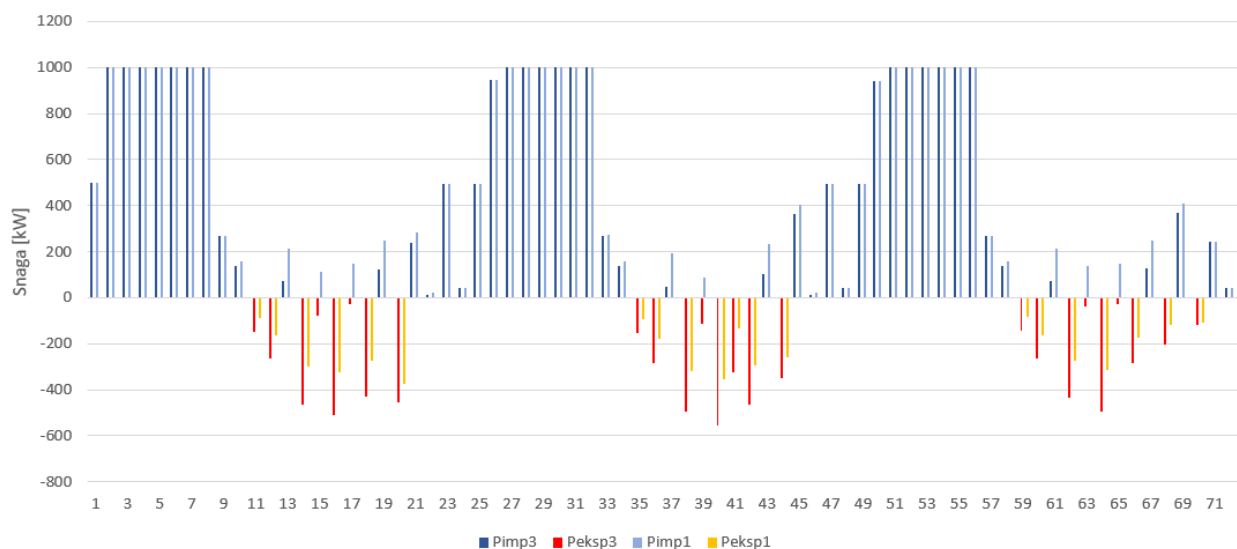


Slika 19 Godišnje snage uvoza i izvoza pristaništa s kapacitetom baterije 500 kWh i instalirane snage 765 kW [kW]

Povećanjem koeficijenta veličine obnovljivih izvora energije smanjio se trošak sustava za 37.9%, ukupan uvoz pao je za 4.8%, dok je izvoz električne energije porastao za 53%. U usporedbi sa povećanjem baterijskog spremnika, ovaj slučaj pokazao se učinkovitijim. Trošak sustava je manji, uvoz je manji, a izvoz je veći što znači da je energetski isplativije ugraditi više solarnih panela nego dodavati veću bateriju.

| Trošak rada [€] | Ukupan uvoz električne energije [kWh] | Ukupan izvoz električne energije [kWh] |
|-----------------|---------------------------------------|--|
| 33 839          | 1 718 308                             | 801 357                                |

Tablica 3 Godišnji troškovi rada, uvoz i izvoz Scenarija 3



Slika 20 Razlika uvoza i izvoza Scenarija 1 i 3 u periodu od tri dana [kW]

Slika 20 prikazuje usporedbu uvoza i izvoza električne energije kroz tri dana u ljetnim mjesecima između scenarija 1 i 3. Moguće je primijetiti da je u svakom trenutku izvoz Scenarija 3 veći od izvoza Scenarija 1, što znači da se povećanjem instalirane snage solarnih panela povećava i količina izvoza električne energije, dok je uvoz ostao gotovo nepromijenjen.

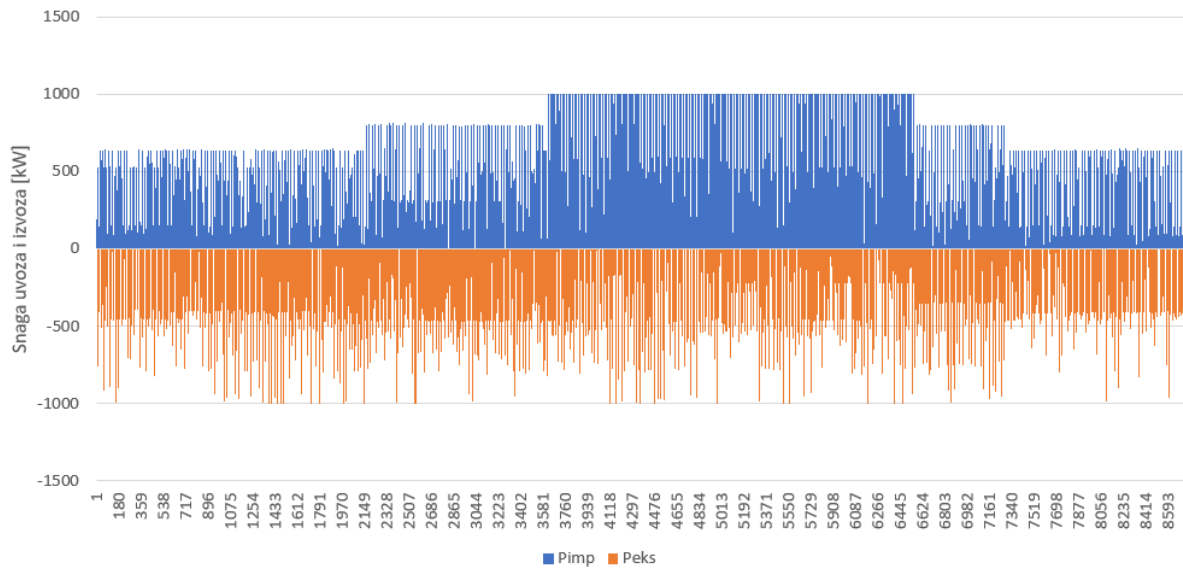
### 3.4 Scenarij 4 – kapacitet baterije 1000 kWh i instalirana snaga 765 kW

Oba prethodna slučaja zasebno smanjuju troškove rada pristaništa, stoga je očekivano da će njihovom kombinacijom rezultati ovakvog modela biti još povoljniji.

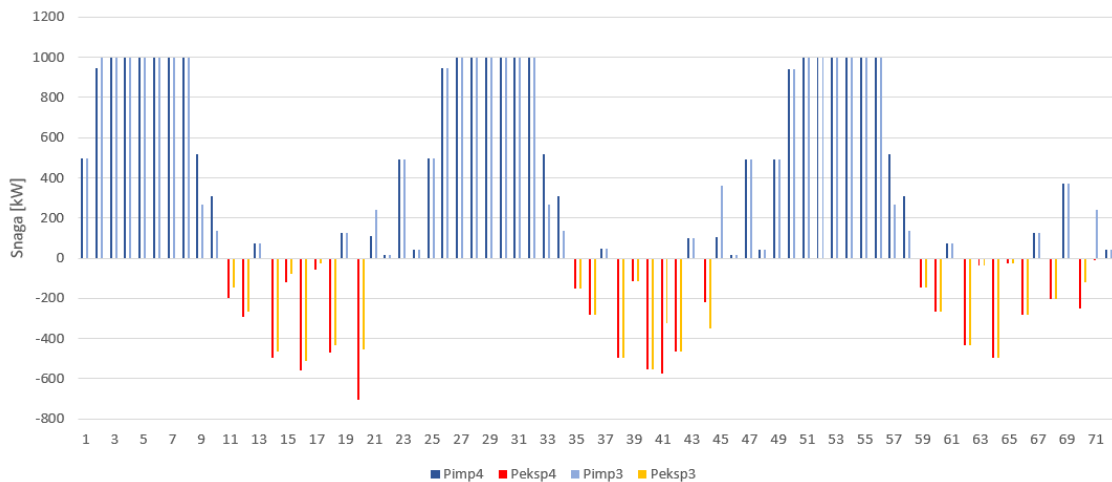
Povećanjem koeficijenta veličine obnovljivih izvora energije i kapaciteta baterijskog spremnika postiže se mnogo efikasniji sustav. Osim u ljetnom periodu, sustav više energije izvozi nego što uvozi. Trošak se snizio za 48% u odnosu na Scenarij 1, uvoz je porastao za 8%, a izvoz za 91%.

| Trošak rada [€] | Ukupan uvoz električne energije [kWh] | Ukupan izvoz električne energije [kWh] |
|-----------------|---------------------------------------|--|
| 28 718          | 1 946 084                             | 1 000 781                              |

Tablica 4 Godišnji troškovi rada, uvoz i izvoz Scenarija 4



Slika 21 Godišnje snage uvoza i izvoza pristaništa instalirane snage 765 kW i kapacitetom baterije 500 kWh [kW]



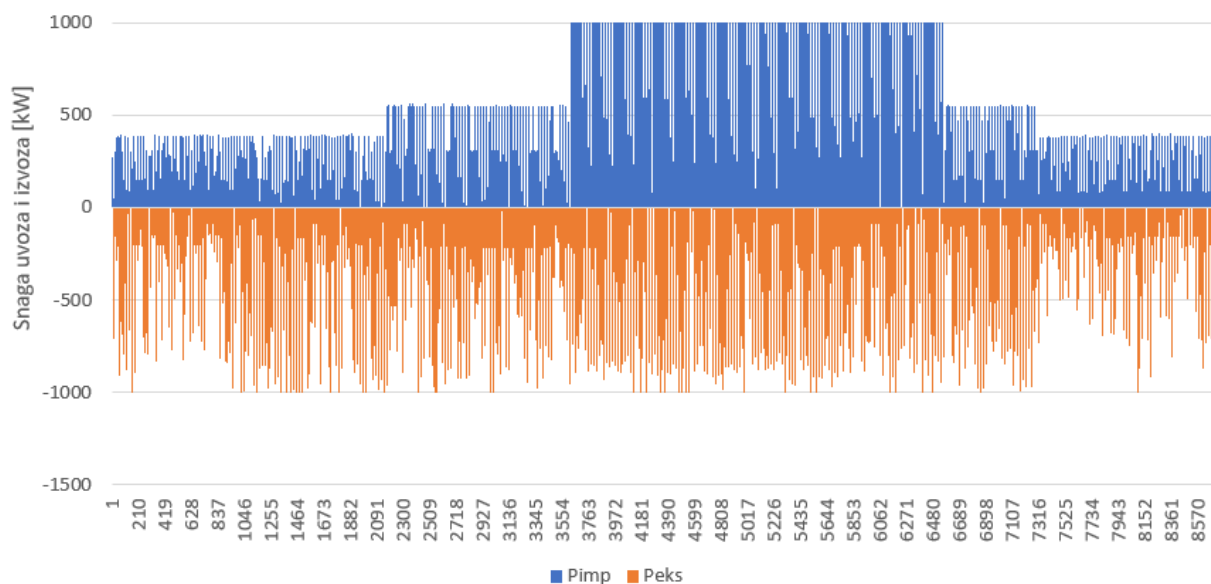
Slika 22 Razlika uvoza i izvoza Scenarija 3 i 4 u periodu od tri dana [kW]

Na slici 22 prikazana je razlika u izvozu i uvozu električne energije u trodnevnom ljetnom periodu između Scenarija 3 i 4. U trenutku 20, moguće je uočiti značajan porast izvoza električne energije između scenarija, a u ostalim trenucima porast postoji, ali je blago izražen.



### 3.5 Scenarij 5 – postizanje nultog troška rada sustava

Još jedan zanimljivi slučaj za promotriti jest kada se dodatnim povećanjem koeficijenta veličine obnovljivih izvora energije postiže trošak rada u iznosu od 0 €. Kako bi se dobila vrijednost  $k_{OIE}$  u ovom slučaju, poseže se za iterativnim postupkom.



Slika 23 Godišnje snage uvoza i izvoza pristaništa s  $k_{OIE} = 2.32$  i kapacitetom baterije 500 kWh [kW]

| Trošak rada [€] | Ukupan uvoz električne energije [kWh] | Ukupan izvoz električne energije [kWh] |
|-----------------|---------------------------------------|--|
| 0               | 1 650 297                             | 1 333 945                              |

Tablica 5 Godišnji troškovi rada, uvoz i izvoz Scenarija 5

Dobiveni rezultat pokazuje da će ukupan trošak rada pristaništa električnih brodova biti 0 € za vrijednost  $k_{OIE} = 2.32$ , odnosno instalirane snage 1183 kW, sa baterijskim spremnikom kapaciteta 500 kWh, odnosno 2.2, što daje instaliranu snagu sustava 1122 kW sa baterijskim spremnikom kapaciteta 1000 kWh. Naravno, za ovakve instalirane snage više nije potreban niskonaponski priključak na mrežu već se mora koristiti srednjenaponski priključak.

Moguće je uočiti podatak da povećanje kapaciteta baterijskog spremnika na duplo veću vrijednost smanjuje potrebnu instalaciju solarnih panela za samo 5%, što takvu izvedbu čini neisplativom u usporedbi samo sa povećanjem instalirane snage solarnih panela bez povećanja kapaciteta baterije. Također, moguće je uočiti kako ukupna energija uvoza i izvoza nisu jednake, makar je to prvo očekivanje koje bi se moglo pretpostaviti. Jedni od uzroka ove pojave su razlika u cijenama električne energije u različitim trenucima tijekom godine te iskoristivost baterije koja iznosi 95% pa se dio energije gubi pri punjenju i pražnjenju.

## 4. ZAKLJUČAK

U ovome radu modelirano je pristanište električnih brodova tako što su se modelirali ulazni podaci poput proizvodnje električne energije, cijene električne energije na tržištu i potražnje za električnom energijom potrošača. Razvijanje matematičkog modela kao i rješavanje istog, napravljeno je u matematičkom alatu GAMS-u. Rezultati upućuju da je integracija obnovljivih izvora energije usko povezana s elektrifikacijom pomorskog transporta. Mijenjanjem kapaciteta baterijskog spremnika i instalirane snage solarnih panela, dobila su se različita rješenja. Povećanjem kapaciteta baterije sa 500 na 1000 kWh postigla se ušteda troška rada u iznosu od 5 000 € u odnosu na prvi scenarij, dok se promjenom instalirane snage solarnih panela s 510 kW na 765 kW uštedilo 20 000 €. Kombinacijom povećanja instalirane snage i kapaciteta baterije postigla se ušteda od 26 000 € u odnosu na prvi scenarij. Samo povećanje kapaciteta baterije smanjuje troškove za samo 10%, dok povećanje instalirane snage solarnih panela smanjuje troškove za bitno veći iznos od 38%. Dakle, moguće je zaključiti da samo povećanje kapaciteta baterije nije efikasan način smanjenja troška rada sustava. Ako pogledamo razliku scenarija povećanja snage solarnih panela sa povećanjem kapaciteta baterije i povećanja snage solarnih panela bez promjene kapaciteta baterije, uočavamo razliku u trošku rada sustava od 15%. Još uvijek povećanje kapaciteta baterije ne rezultira značajnim smanjenjem troška rada sustava. Za postizanje troška rada pristaništa od 0 €, bilo je potrebno povećati instaliranu snagu 2.32 puta, sa 510 na 1183 kW, za kapacitet baterije 500 kWh, odnosno 2.2 puta, sa 510 na 1122 kW, za kapacitet baterije 1000 kWh. Ovaj scenarij također potvrđuje da je isplativiji način smanjenja troškova rada pristaništa onaj u kojem se povećava samo instalirana snaga solarnih panela, dok se kapacitet baterije ne mijenja.

## 5. LITERATURA

- [1] <https://mrelectric.com/blog/the-history-of-electricity-history-of-electricity-timeline>
- [2] [https://www.forseafferries.com/globalassets/blocks/arsredovisning/hallbarhet/forsea\\_sustainability\\_report\\_2021.pdf](https://www.forseafferries.com/globalassets/blocks/arsredovisning/hallbarhet/forsea_sustainability_report_2021.pdf)
- [3] <https://electrek.co/2021/12/21/tritium-partners-with-aqua-superpower-to-expand-charging-network-for-electric-boats/>
- [4] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Fotonaponska\\_plo%C4%8Da](https://hr.wikipedia.org/wiki/Fotonaponska_plo%C4%8Da)
- [5] <https://www.hep.hr/u-rad-pustena-suncana-elektrana-vis-najveca-suncana-elektrana-u-hrvatskoj/3549>
- [6] <https://www.zerohomebills.com/product/tesvolt-lithium-battery-storage-500-kwh-tlc500/>
- [7] <https://www.energy.gov/oe/demand-response>
- [8] <https://www.dubrovnik.hr/vijesti/u-brsecinama-se-razvija-ekoloski-odrzivi-projekt-dubrovnik-elafiti-gate;-ukljujuje-parkiraliste-s-pristanistem-i-brodskom-vezom-za-lopud-i-sipan-15032>
- [9] <https://www.cropex.hr/hr/trgovanja/godisnja-i-mjesečna-izvješća.html>
- [10] <https://www.hep.hr/ods/opskrbljivaci/pravila-primjene-nadomjesnih-krivulja-opterećenja/podaci-za-izračun-2021/697>
- [11] [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/)

## PRILOG

### Kod u programskom alatu GAMS

```
44
45 Binary variable
46 y(t)
47 z(t);
48
49 scalar
50 SOC0 / 50 /
51 SOCmax / 500.0 /
52 koloie /1/;
53
54 SOC.up(t) = 0.9*SOCmax;
55 SOC.lo(t) = 0.1*SOCmax;
56 SOC.fx(t)$(ord(t)=1) = 50;
57
58 Pc.up(t) = 0.5*SOCmax;
59 Pc.lo(t) = 0;
60 Pd.up(t) = 0.5*SOCmax;
61 Pd.lo(t) = 0;
62
63 xp1.up(t) = 150;
64 xp1.lo(t) = 0;
65
66 xp2.up(t) = 300;
67 xp2.lo(t) = 0;
68
69 xp3.up(t) = 1000;
70 xp3.lo(t) = 0;
71
72 Pimp.up(t) = 1000;
73 Pimp.lo(t) = 0;
74
75 Peks.up(t) = 1000;
76 Peks.lo(t) = 0;
77
78 DRb.up(t)= 0.1*Dbrod(t,'Dbrod');
79 DRb.lo(t)=0;
80
81 DRrb.up(t)= 0.1*Dbrod(t,'Dbrod');
82 DRrb.lo(t)=0;
```

```
1 set
2 t 'hours' /t1*t8760/
3
4 variable
5 cost 'cost '
6 soc(t) 'stanje napunjenosti baterije'
7 Pd(t) 'praznjenje baterije'
8 Pc(t) 'punjenje baterije'
9 DR(t) 'vrijednost demand responsa'
10 Pimp(t) 'uvoz energije'
11 Peks(t) 'izvoz energije'
12 xp1(t) 'izvoz energije punjača 1'
13 xp2(t) 'izvoz energije punjača 2'
14 xp3(t) 'izvoz energije punjača 3'
15 DRb(t)
16 DRrb(t);
17
18 $call gdxrw.exe Zavrzni.xlsx par=Solar rng=Solari!A1:B8761
19 Parameter Solar(t,*);
20 $gdxin Zavrzni.gdx
21 $load Solar
22 $gdxin
23
24
25 $call gdxrw.exe Zavrzni.xlsx par=Dluka rng=Demandluka!A1:B8761
26 Parameter Dluka(t,*);
27 $gdxin Zavrzni.gdx
28 $load Dluka
29 $gdxin
30
31 $call gdxrw.exe Zavrzni.xlsx par=Dbrod rng=Demandelb!A1:B8761
32 Parameter Dbrod(t,*);
33 $gdxin Zavrzni.gdx
34 $load Dbrod
35 $gdxin
36
37 $call gdxrw.exe Zavrzni.xlsx par=Cijena rng=Cijenaelen!A1:B8761
38
39 Parameter Cijena(t,*);
40 $gdxin Zavrzni.gdx
41 $load Cijena
42 $gdxin
```

```
83
84 Equation costThermalcalc, balance, constESS, charge, discharge, chargers, fleksi, DemR, DemRr;
85
86 costThermalcalc.. cost =e= sum(t, (Pimp(t)-Peks(t))*Cijena(t, 'Cijena'));
87
88 balance(t).. Pimp(t)+Pd(t)+koloie*Solar(t, 'Solar')+DRb(t) =e=
89             Peks(t)+Pc(t)+Dbrod(t, 'Dbrod')+Dluka(t, 'Dluka')+DRrb(t);
90
91 constESS(t).. SOC(t) =e= SOC0$(ord(t)=1) + SOC(t-1)$(ord(t)>1) +
92             (0.95*Pc(t) - Pd(t)/0.95)*1;
93
94 charge(t).. Pc(t) =l= 0.5*SOCmax*y(t);
95
96 discharge(t).. Pd(t) =l= 0.5*SOCmax*(1-y(t));
97
98 chargers(t).. xp1(t)+xp2(t)+xp3(t) =e= Dbrod(t, 'Dbrod')-DRb(t)+DRrb(t);
99
100 fleksi.. sum(t, DRb(t)) =e= sum(t, DRrb(t));
101
102 DemR(t).. DRb(t) =l= 0.1*Dbrod(t, 'Dbrod')*z(t);
103
104 DemRr(t).. DRrb(t) =l= 0.1*Dbrod(t, 'Dbrod')*(1-z(t));
105
106
107
108 Model Luka /all/;
109
110 solve Luka using mip minimize cost;
111
```