

# Fleksibilni rad vjetroparka s integriranom Carnotovom baterijom

---

**Petric, Blaž**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*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:235:965768>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-14**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Blaž Petric**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**FLEKSIBILNI RAD  
VJETROPARKA S  
INTEGRIRANOM  
CARNOTOVOM BATERIJOM**

Mentor:

Dr. sc. Ante Marušić, mag. ing.

Student:

Blaž Petric

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se svom mentoru doc. dr. sc. Anti Marušiću na susretljivosti, vodstvu i nesebičnoj pomoći kada je to bilo najpotrebnije.

Također bih se zahvalio prof. geog. Zvonimiru Dorkinu, voditelju odsjeka za prostorno uređenje Zadarske županije na ustupanju podataka s mjernog stupa Bili Brig.

Posebno sam zahvalan Energetskom institutu Hrvoje Požar i mome mentoru Dariu Forgaču na svom prenesenom znanju i svakoj prilici koju mi je dao za rad na projektima.

Izražavam duboku zahvalnost svojim roditeljima koji su mi pružili sve u životu i čiju podršku i ljubav nikada neću zaboraviti. Hvala i mojim bakama, djedu na brizi, te prijateljima koji su mi omogućili da iskusim razne aspekte života. Zahvaljujući dobrim ljudima oko mene, postigao sam ovo što jesam, a mnogo toga dugujem njihovoj pomoći i podršci.

Hvala dragom Bogu jer bez njega nema ništa.

Blaž Petric



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:



Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

|  |        |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum  | Prilog |
| Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1                                |        |
| Ur.broj: 15 - 24 -   |        |

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Blaž Petric**

JMBAG: 0035220085

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Fleksibilni rad vjetroparka s integriranom Carnotovom baterijom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Flexible operation of wind farm with integrated Carnot battery**

Opis zadatka:

Rast udjela obnovljivih izvora energije (OIE) u elektroenergetskom sustavu vodi ka sve većoj volatilnosti cijena električne energije. Periodi izrazito niskih cijena električne energije koreliraju s visokim udjelom proizvodnje iz OIE pa se uz suvremene vjetroelektrane sve češće razmatra instalacija velikih sustava za pohranu energije.

Dok baterijski sustavi imaju najbolje značajke u pogledu snage i efikasnosti, njihov visoki investicijski trošak česta je prepreka njihovoj izgradnji. Iz navedenog razloga sve se više razmatraju alternativni sustavi pohrane električne energije, među njima i visoko-temperaturni indirektni spremnici električne energije, poznati i kao Carnotove baterije. Prednost Carnotovih baterija je relativno nizak investicijski trošak dok je njihov nedostatak niska efikasnost pohrane.

U sklopu ovog zadatka potrebno je:

1. Napraviti procjenu godišnjeg profila proizvodnje električne energije iz vjetroparka nazivne snage 40 MW na lokaciji u blizini Zadra;
2. Odabrati tehnologiju pohrane topline i dimenzionirati odgovarajući toplinski spremnik u sklopu Carnotove baterije;
3. Napraviti godišnju simulaciju rada vjetroparka s integriranom Carnotovom baterijom.

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

Zadatak zadan:

9. svibnja 2024.

Datum predaje rada:

11. srpnja 2024.

Predviđeni datumi obrane:

15. – 19. srpnja 2024.

Zadatak zadao:

Doc.dr.sc. Ante Marušić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

**SADRŽAJ**

|   |      |
|---|------|
| SADRŽAJ .....   | I    |
| POPIS SLIKA .....   | III  |
| POPIS TABLICA .....   | V    |
| POPIS OZNAKA .....  | VI   |
| POPIS KRATICA .....   | VIII |
| SAŽETAK .....   | IX   |
| SUMMARY .....   | X    |
| 1. UVOD .....   | 1    |
| 2. POHRANA TOPLINSKE ENERGIJE .....                                 | 3    |
| 3. PROJEKTIRANJE VJETROELEKTRANE .....                              | 7    |
| 3.1. Općenito o pokrovu terena i orografiji .....                   | 8    |
| 3.2. Općenito o mjernoj kampanji .....                              | 10   |
| 3.3. Projektiranje VE Bili Brig .....                               | 11   |
| 3.3.1. Opis mjerne lokacije i mjerni podaci .....                   | 11   |
| 3.3.2. Izrada topografije .....                                     | 15   |
| 3.3.3. Ograničenja i obuhvat VE Bili Brig .....                     | 17   |
| 3.3.4. Modeliranje računalnim programom WindSim .....               | 19   |
| 4. KONFIGURACIJA I PRORAČUN CARNOTOVE BATERIJE .....                | 25   |
| 4.1. Matematički model spremnika za akumulaciju topline .....       | 26   |
| 4.1.1. Proces punjenja .....  | 27   |
| 4.1.2. Proces pražnjenja .....                                      | 31   |
| 4.2. Proračun generatora pare na otpadnu toplinu .....              | 31   |
| 4.3. Proračun snage turbine i efikasnosti Rankineovog procesa ..... | 36   |
| 5. REZULTATI SIMULACIJE RADA VE I CARNOTOVE BATERIJE .....          | 39   |
| 5.1. Validacija modela (bez integrirane VE Bili Brig) .....         | 39   |
| 5.2. Model s integriranom VE Bili Brig .....                        | 41   |
| 5.2.1. Period rada tijekom 1. mjeseca .....                         | 43   |
| 5.2.2. Period rada tijekom 8. mjeseca .....                         | 45   |

|                  |    |
|------------------|----|
| ZAKLJUČAK .....  | 48 |
| LITERATURA ..... | 49 |

## POPIS SLIKA

|   |    |
|---|----|
| Slika 1 Pojednostavljena shema sustava Carnotove baterije [2].....  | 5  |
| Slika 2 Prikaz postrojenja za pohranu energije u Hamburgu [9].....  | 6  |
| Slika 3 Primjer krivulje očekivane godišnje proizvodnje električne energije (AEP) u odnosu na vjerojatnost odstupanja u Gaussovoj distribuciji [11] ..... | 7  |
| Slika 4 Primjer jednostavnog terena [12].....   | 8  |
| Slika 5 Primjer složenog terena [12].....   | 9  |
| Slika 6 Utjecaj različitih veličina hrapavosti terena na vertikalni profil vjetra [13].....   | 9  |
| Slika 7 Lokacija MS Bili Brig zajedno s proračunskom domenom 30 x 30 km .....   | 11 |
| Slika 8 Utjecaj parametra $k$ na izgled krivulje [10].....  | 13 |
| Slika 9 Dijagram učestalosti brzine na mjernoj lokaciji Bili Brig zajedno s Weibull aproksimacijom.....   | 14 |
| Slika 10 Frekvencijska ruža vjetrova na mjernoj lokaciji Bili Brig.....   | 15 |
| Slika 11 Orografija terena dobivena iz EU-DEM digitalnog modela terena (teren je modeliran u <i>Global Mapper</i> -u) [16] .....                          | 16 |
| Slika 12 Hrapavost površine dobivena iz baze podataka Corine ( <i>CLC 2018</i> ) (teren je modeliran u <i>Global Mapper</i> -u) [17] .....                | 17 |
| Slika 13 Prikaz ograničenja i obuhvata VE na lokaciji.....  | 18 |
| Slika 14 Obuhvat VE Bili Brig s prikazom prostornog plana kao podlogom .....  | 18 |
| Slika 15 Prikaz mreže kontrolnih volumena.....  | 19 |
| Slika 16 Prikaz vertikalne diskretizacije.....  | 20 |
| Slika 17 Resursna karta vjetra i odabrana konfiguracija VA.....   | 21 |
| Slika 18 Krivulja trajanja proizvodnje električne energije dobivena simulacijom za 2022. godinu .....   | 23 |
| Slika 19 Usporedba vertikalnih profila simulacije i mjerenja za sektor $45^\circ$ .....   | 23 |
| Slika 20 Usporedba vertikalnih profila simulacije i mjerenja za sektor $112,5^\circ$ .....  | 24 |
| Slika 21 Shema strujanja zraka kroz spremnik za akumulaciju topline.....  | 26 |
| Slika 22 Pojednostavljena shema diskretizacije referentne cijevi .....  | 29 |
| Slika 23 Shematski prikaz generatora pare na povratnu toplinu [23].....   | 32 |
| Slika 24 Općeniti temperaturni profil procesa u generatoru pare na povratnu toplinu.....  | 33 |
| Slika 25 T-s dijagram procesa zagrijavanja i isparavanja vode/pare u generatoru pare .....  | 35 |
| Slika 26 Raspodjela temperature u generatoru pare .....   | 36 |



---

|  |    |
|--|----|
| Slika 27 T-s dijagram Rankineovog procesa .....  | 37 |
| Slika 28 Temperaturni profili zraka i vulkanskih stijena u 1. segmentu spremnika.....  | 39 |
| Slika 29 Temperaturni profili zraka i vulkanskih stijena u 10. segmentu spremnika.....   | 40 |
| Slika 30 Snaga grijača prilikom procesa punjenja .....   | 41 |
| Slika 31 Proizvodnja VE Bili Brig za odabrani period.....  | 42 |
| Slika 32 Cijena električne energije za odabrani period .....   | 42 |
| Slika 33 Snaga grijača i proizvodnja električne energije iz spremnika – 1. mjesec .....  | 43 |
| Slika 34 Pohranjeni kapacitet električne energije iz VE i proizvedena električna energija iz Rankineovog procesa – 1. mjesec ..... | 44 |
| Slika 35 Temperaturni profili zraka i vulkanskih stijena u izlaznom segmentu – 1. mjesec...  | 45 |
| Slika 36 Snaga grijača i proizvodnja električne energije iz spremnika – 8. mjesec .....  | 46 |
| Slika 37 Pohranjeni kapacitet električne energije iz VE i proizvedena električna energija iz Rankineovog procesa – 8. mjesec ..... | 46 |
| Slika 38 Temperaturni profili zraka i vulkanskih stijena u izlaznom segmentu – 8. mjesec...  | 47 |

---

**POPIS TABLICA**

|  |    |
|--|----|
| Tablica 1 Hrapavosti površine za različite tipove terena [15] .....                    | 10 |
| Tablica 2 Opis proračunske domene.....   | 11 |
| Tablica 3 Glavne karakteristike mjerenja parametra vjetra na MS Bili Brig .....        | 12 |
| Tablica 4 Opis pozicija VA.....  | 22 |
| Tablica 5 Rezultati proizvodnje električne energije .....                              | 22 |
| Tablica 6 Dimenzije i svojstva vulkanskih stijena.....                                 | 25 |
| Tablica 7 Entalpije u karakterističnim dijelovima generatora pare .....                | 35 |
| Tablica 8 Parametri pregrijane pare .....  | 36 |
| Tablica 9 Pragovi cijena kupnje i prodaje električne energije Carnotove baterije ..... | 43 |

## POPIS OZNAKA

| Oznaka          | Jedinica               | Opis  |
|-----------------|------------------------|---|
| $A$             | $m^2$                  | Poprečni presjek spremnika za akumulaciju topline                   |
| $A_f$           | $m^2$                  | Poprečni presjek strujanja zraka                                    |
| $A_p$           | $m^2$                  | Površina izmijene topline konvekcijom                               |
| $c_{p,s}$       | $\text{kJ/kgK}$        | Specifični toplinski kapacitet vulkanskih stijena                   |
| $c_{p,z}$       | $\text{kJ/kgK}$        | Specifični toplinski kapacitet zraka                                |
| $D$             | $m$                    | Promjer spremnika za akumulaciju topline                            |
| $D_0$           | $m$                    | Promjer referentne cijevi   |
| $d_s$           | $m$                    | Promjer vulkanske stijene   |
| $f_a$           | -                      | Faktor oblika   |
| $g$             | $\text{m/s}^2$         | Ubrzanje sile teže  |
| $h_{wL}$        | $\text{J/kg}$          | Entalpija vrele kapljevine  |
| $h_{wV}$        | $\text{J/kg}$          | Entalpija suhozasićene pare   |
| $h_{w1}$        | $\text{J/kg}$          | Entalpija vode na ulazu u ekonomajzer                               |
| $h_{w2}$        | $\text{J/kg}$          | Entalpija vode na izlazu iz ekonomajzera                            |
| $h_{w4}$        | $\text{J/kg}$          | Entalpija pregrijane pare   |
| $h_{w5}$        | $\text{J/kg}$          | Entalpija nakon adijabatske ekspanzije                              |
| $h_{w5,s}$      | $\text{J/kg}$          | Entalpija nakon izentropske ekspanzije                              |
| $k_{charge}$    | $\text{W/m}^2\text{K}$ | Koeficijent prolaza topline prilikom punjenja                       |
| $k_{discharge}$ | $\text{W/m}^2\text{K}$ | Koeficijent prolaza topline prilikom pražnjenja                     |
| $L$             | $m$                    | Dužina spremnika za akumulaciju topline                             |
| $M_s$           | $\text{kg}$            | Masa vulkanskih stijena u segmentu spremnika za akumulaciju topline |
| $M_z$           | $\text{kg}$            | Masa zraka u segmentu spremnika za akumulaciju topline              |
| $m_s$           | $\text{kg}$            | Masa vulkanskih stijena   |
| $Nu_{turb}$     | -                      | Nusseltov broj turbulentnog strujanja                               |
| $Nu_{lam}$      | -                      | Nusseltov broj laminarnog strujanja                                 |
| $Nu_{fo}$       | -                      | Nusseltov broj prisilne konvekcije                                  |
| $n_s$           | -                      | Broj stijena u diskretiziranom segmentu                             |
| $P$             | $\text{W}$             | Snaga grijača   |
| $P_{el}$        | $\text{W}$             | Korekcijska snaga turbine   |
| $P_t$           | $\text{W}$             | Snaga turbine   |
| $Pr$            | -                      | Prandtlov broj  |
| $p_w$           | $\text{Pa}$            | Tlak zasićenja pare   |
| $Re$            | -                      | Reynoldsov broj   |
| $S_{w4}$        | $\text{kJ/kgK}$        | Entropija pregrijane pare   |

|                     |                    |   |
|---------------------|--------------------|---|
| $s_{w5,s}$          | kJ/kgK             | Entropija nakon izentropske ekspanzije pregrijane pare            |
| $Q_s$               | J                  | Toplinski kapacitet spremnika za akumulaciju topline              |
| $q_{m,w}$           | kg/s               | Maseni protok pare  |
| $q_{m,z}$           | kg/s               | Maseni protok zraka   |
| $V_0$               | m <sup>3</sup>     | Volumen diskretiziranog segmenta spremnika za akumulaciju topline |
| $v_z$               | m/s                | Brzina zraka  |
| $\alpha_{charge}$   | W/m <sup>2</sup> K | Koeficijent prijelaza topline prilikom punjenja                   |
| $\beta$             | K <sup>-1</sup>    | Koeficijent toplinskog širenja                                    |
| $\Delta_{approach}$ | °C                 | Approach točka  |
| $\Delta_{pinch}$    | °C                 | Pinch točka   |
| $\varepsilon$       | -                  | Faktor poroznosti   |
| $\zeta_q$           | -                  | Gubitak topline   |
| $\eta$              | -                  | Iskoristivost Rankineovog ciklusa                                 |
| $\eta_t$            | -                  | Izentropska iskoristivost turbine                                 |
| $\vartheta_{cond}$  | °C                 | Temperatura kondenzacije pare                                     |
| $\vartheta_s$       | °C                 | Prosječna temperatura vulkanskih stijena                          |
| $\vartheta_{w1}$    | °C                 | Temperatura vode na ulazu u ekonomajzer                           |
| $\vartheta_{w2}$    | °C                 | Temperatura vode na izlazu iz ekonomajzera                        |
| $\vartheta_{w3}$    | °C                 | Temperatura pare na ulazu iz pregrijača                           |
| $\vartheta_{w4}$    | °C                 | Temperatura pare na izlazu iz pregrijača                          |
| $\vartheta_z$       | °C                 | Prosječna temperatura zraka                                       |
| $\vartheta_{z1}$    | °C                 | Temperatura zraka na ulazu u pregrijač                            |
| $\vartheta_{z2}$    | °C                 | Temperatura zraka na ulazu u isparivač                            |
| $\vartheta_{z3}$    | °C                 | Temperatura zraka na izlazu iz pregrijača                         |
| $\vartheta_{z4}$    | °C                 | Temperatura zraka na izlazu iz ekonomajzera                       |
| $\lambda_s$         | W/mK               | Toplinska provodnost stijene                                      |
| $\lambda_z$         | W/mK               | Toplinska provodnost zraka  |
| $\nu_z$             | m <sup>2</sup> /s  | Viskoznost zraka  |
| $\rho_s$            | kg/m <sup>3</sup>  | Gustoća vulkanskih stijena  |
| $\rho_z$            | kg/m <sup>3</sup>  | Gustoća zraka   |
| $\phi_{eko}$        | W                  | Toplinski tok ekonomajzera  |
| $\phi_{isp}$        | W                  | Toplinski tok isparivača  |
| $\phi_{preg}$       | W                  | Toplinski tok pregrijača  |
| $\phi_{uk}$         | W                  | Ukupan toplinski tok generatora pare                              |
| $\phi_n$            | W                  | Toplinski tok u segmentu između zraka i vulkanskih stijena        |
| $\omega_A$          | -                  | Faktor udjela masenog protoka                                     |

## POPIS KRATICA

| <b>Oznaka</b> | <b>Opis</b>                |
|---------------|----------------------------|
| MS            | Mjerni stup                |
| OIE           | Obnovljivi izvori energije |
| TES           | Thermal energy storage     |
| VA            | Vjetroagregat              |
| VE            | Vjetroelektrana            |

## SAŽETAK

U ovom radu je razvijen model Carnotove baterije u *MATLAB-u* i *Simulinku*, te je projektirana vjetroelektrana snage 40-ak MW korištenjem programa *WindSim*. Cilj rada bio je simulirati integriranu proizvodnju električne energije iz vjetroelektrane s modelom Carnotove baterije kapaciteta 100 MWh kako bi se vršilo pohranjivanje energije kada je cijena električne energije niska i njena proizvodnja korištenjem Rankineovog ciklusa kada je cijena električne energije visoka.

Projektiranje vjetroelektrane uključivalo je: analizu mjernih podataka s mjernog stupa Bili Brig, modeliranje terena i pokrova lokacije, izbor optimalnih lokacija za vjetroagregate i procjenu njihove ukupne proizvodnje energije.

Uz razvijeni model Carnotove baterije, dodatno su u simulaciju uključeni model generatora pare na otpadnu toplinu i električni grijač. Također je napravljen proračun Rankineovog ciklusa u stacionarnom stanju kako bi se izračunala iskoristivost cijelog procesa.

Prvo su prikazani rezultati simulacije dinamike sustava Carnotove baterije bez integrirane vjetroelektrane kako bi se ispitalo osnovno ponašanje sustava. Nakon toga, rezultati uključuju dinamiku s integriranom proizvodnjom vjetroelektrane u 1. i 8. mjesecu 2022. godine.

Iskoristivost pohrane električne energije u Carnotove baterije dostiže vrijednost od 30,6 %.

Ključne riječi: Carnotova baterija, vjetroelektrana

## SUMMARY

In this paper, a model of the Carnot battery was developed in *MATLAB* and *Simulink*, and a wind farm with a capacity of approximately 40 MW was designed using the *WindSim* software. The aim of the paper was to simulate the integrated production of electricity from the wind farm with the Carnot battery model with a capacity of 100 MWh to store energy when electricity prices are low and produce it using the Rankine cycle when electricity prices are high.

The design of the wind farm included the analysis of measurement data from the Bili Brig measurement mast, modeling the terrain and land cover of the location, selecting optimal locations for wind turbines, and estimating their total energy production.

In addition to the developed Carnot battery model, the simulation also included a model of a heat recovery steam generator and an electric heater. A stationary state calculation of the Rankine cycle was also performed to determine the efficiency of the entire process.

First, the results of the simulation of the Carnot battery system dynamics without the integrated wind farm are presented to examine the basic behavior of the system. After that, the results include the dynamics with the integrated wind farm production in January and August 2022.

The energy storage efficiency of the Carnot battery reaches a value of 30.6%.

Key words: Carnot battery, wind farm

## 1. UVOD

Usljed neizvjesnosti u opskrbi konvencionalnim energentima, rastućim cijenama prirodnog plina i nafte te sve veće svjesnosti o njihovom štetnom utjecaju na okoliš u smislu antropogenih emisija ugljikovog dioksida (CO<sub>2</sub>), sve se češće koriste obnovljivi izvori energije (OIE). OIE postaju ključni dio sustava opskrbe električne energijom. Tijekom proteklog desetljeća, troškovi obnovljivih energetskih tehnologija poput fotonaponskih panela i vjetroagregata, smanjili su se na razinu gdje je cijena električne energije ekonomičnija od cijene električne energije konvencionalnih goriva. Upravo je sektor proizvodnje električne energije odgovoran za najveće emisije stakleničkih plinova od svih ekonomskih sektora [1]. Za ostvarenje ključnih i nužnih ciljeva neutralnosti stakleničkih plinova, potrebno je značajno investirati u istraživanja i razvoj pouzdanog energetskog sustava [2].

Variranje dostupnosti obnovljivih izvora energije tijekom vremena, koje ovisi o vremenskim uvjetima, dobu dana i godišnjem dobu, predstavlja izazove za stabilnost energetskog sustava i kvalitetu opskrbe električnom energijom. Potrošnja energije također nije konstantna tijekom vremena, već se mijena ovisno o aktivnostima ljudi, radnom satu i vremenskim uvjetima. Zbog ovisnosti o lokaciji postrojenja obnovljivih izvora energije i udaljenosti od centra opterećenja, potrebno je povećati razinu prijenosa kako bi se osigurala dovoljna opskrba električnom energijom [2].

S druge strane, elektrane na fosilna goriva mogu brzo povećati ili smanjiti proizvodnju električne energije, stoga njihova zamjena intermitentnom energijom vjetra i sunca zahtijeva dodatne tehničke napore kako bi se zadovoljile promjenjive potrebe za energijom u sektorima električne energije, toplinske energije i prometa.

Skladištenja energije, kao što su litij-ionske baterije, reverzibilne hidroelektrane, Carnotove baterije, djeluju kao posrednici između proizvodnje i potrošnje električne energije. Oni omogućuju pohranu viška energije iz obnovljivih izvora kada je dostupna, a zatim je oslobađaju kada je potrebno kako bi se zadovoljila potražnja. Na taj način, navedeni sustavi pružaju stabilnost u opskrbi energijom, smanjujući ovisnost o konvencionalnim izvorima energije i potiču veću upotrebu obnovljivih izvora. Tvrtka Drax, koja se bavi OIE, ističe kako je tijekom 2020. i 2021. godine u Ujedinjenom Kraljevstvu izgubljena proizvedena električna energija iz vjetroelektrana koja bi mogla napajati grad od 800 000 stanovnika zbog nedostatka sustava pohrane električne energije [3]. Ova tvrdnja naglašava neophodnost implementacije takvih sustava u energetski sustav.



Danas su najpoznatije tehnologije skladištenja električne energije reverzibilne hidroelektrane i litij-ionske baterije. Kako bi se postigle visoke razine snage tijekom duljeg vremenskog perioda, potrebno je imati odgovarajuću visinsku razliku između akumulacijskog jezera i turbine. Razvoj sustava reverzibilne hidroelektrane ima ograničenje zbog ovisnosti o geografskoj lokaciji koje su gotovo iscrpljene. No, ukoliko je lokacija pogodna, mogu se smanjiti početni investicijski troškovi. Trenutna učinkovitost reverzibilnih hidroelektrana varira između 70% i 80%, pri čemu neka istraživanja navode da se ta učinkovitost može povećati čak do 87% [4]. Sustavi koji koriste baterije za pohranu električne energije suočavaju se s ograničenjima kao što su kratak vijek trajanja te visoka cijena po jedinici kapaciteta [5]. Zbog opisanog nedostatka adekvatne tehnologije istražuje se alternativna metoda pohrane, Carnotova baterija, koja se u ovom radu integrira s vjetroelektranom kako bi se napravila godišnja simulacija rada cijelog sustava. Ova kombinacija omogućuje ne samo smanjenje gubitaka energije, već i veću fleksibilnost i pouzdanost u opskrbi električnom energijom, čime se doprinosi održivijem energetsom sustavu.

## 2. POHRANA TOPLINSKE ENERGIJE

Toplinska energije može se pohraniti u obliku osjetne, latentne ili reakcijske (termokemijska) topline.

Spremnici za pohranu osjetne topline iskorištavaju toplinski kapacitet medija za pohranu [6]. Ova vrsta toplinskih spremnika pohranjuje toplinsku energiju mijenjanjem temperature medija, te je ona proporcionalna s dovođenjem iste. Najčešće su to materijali koji imaju visok specifični toplinski kapacitet poput vode ili materijali poput kamena, soli, betona ili keramike [7] koji su sposobni ostvariti velike temperaturne razlike jer upravo akumulirana toplinska energija ovisi o ova dva svojstva koja su ovisna o vrsti materijala; specifičnom toplinskom kapacitetu i razlici minimalne i maksimalne temperature radnog medija u spremniku. Prednost ovih materijala je što su relativno jeftini za pohranu energije. Specifični toplinski kapacitet vode je otprilike 4 puta veći nego specifični toplinski kapacitet stijena [8], no vodi je potrebno povisiti radni tlak kako bi dostigla temperaturu veću od 100 °C, dok materijali tipa stijena lako može doseći temperature od 700 °C. U članku [8] autori navode kako je specifični kapacitet sustava za pohranu osjetne topline nizak te se kreće od 10 – 20 Wh/kg toplinske energije. Procijenjeni kapitalni troškovi (eng. CAPEX) sustava za pohranu osjetne topline su u rasponu 3400 – 4500 \$/kW, dok je cijena po pohranjenoj jedinici u rasponu od 0,1 – 10 \$/kWh što je vrlo jeftino [8]. Spremnici za pohranu latentne topline sposobni su pohraniti toplinsku energiju iskorištavajući toplinu koja se apsorbira ili oslobađa tijekom promjene faze materijala. Ti materijali (eng. *Phase Change Material* – PCMs) su sposobni apsorbirati ili osloboditi velike količine topline tijekom promjene faze zbog visoke specifične latentne topline taljenja ili isparavanja, omogućujući učinkovitu pohranu i oslobađanje energije. Na primjer, u slučaju vode, njezino otapanje može pružiti približno 80 puta više energije od podizanja temperature kapljevine vode za 1 °C [7]. Iz tog razloga potreban je manji volumen za skladištenjem iste količine energije u odnosu na sustave sa skladištenjem osjetne topline. U članku [8] autori navode kako je specifični kapacitet sustava za pohranu latentne topline visok te se kreće od 50 – 150 Wh/kg toplinske energije. Međutim, kapitalni troškovi sustava su u rasponu 6000 – 15000 \$/kW, dok je cijena po pohranjenoj jedinici u rasponu od 10 – 50 \$/kWh što je značajno više u usporedbi sa sustavima pohrane osjetne topline [8].

Sustavi za kemijsku pohranu toplinske energije pohranjuju toplinsku energiju korištenjem reverzibilnih kemijskih reakcija koje uključuju apsorpciju ili oslobađanje topline, tj. promjenom entalpije sustava. Koriste se materijali koji mogu kemijski reagirati kako bi

pohranili energiju, a zatim oslobodili kada se reakcija obrne. Uobičajeni materijali za termokemijsku pohranu su metalni hidridi, metalni oksidi i određene soli [7]. Primjerice, vezanje vodika u metal-hidridima ili prilikom pada tlaka otvaranjem ventila na boci, vodik se odvaja od metala uz oslobađanje topline [6]. Termokemijska pohrana ima potencijal pohranjivanja i oslobađanja velikih količina energije, što je čini pogodnom za visokotemperaturne primjene, a razlog je izuzetno visoka gustoća energije. Osim prednosti u pogledu visoke gustoće energije, termokemijska pohrana također ima mogućnost dugoročne pohrane i sposobnost oslobađanja topline pri konstantnoj temperaturi [7]. Kapitalni trošak potreban za sustav termokemijske pohrane kreće se u rasponu 1000 – 3000 \$/kW, a toplinski kapacitet 120 – 250 Wh/kg. Cijena po pohranjenoj jedinici iznosi 8 – 100 \$/kWh, što ga čini najskupljim od tri tehnologije pohrane topline [8].

Razlikujemo dva glavna tipa toplinskih spremnika ovisno o vremenskom okviru kada pohranjena energija treba biti dostupna: spremnike za kratkoročnu pohranu i spremnike za sezonsku pohranu. Spremnici za kratkoročnu pohranu su dizajnirani za balansiranje proizvodnje i potrošnje energije u kratkom vremenskom rasponu, obično je to nekoliko sati do nekoliko dana [6]. S druge strane, sezonski spremnici imaju znatno veće kapacitete i namijenjeni su za dugotrajniju pohranu energije, te imaju sposobnost balansiranja proizvodnje i potrošnje energije tijekom sezone [6].

Istraživanja su nedavno počela naglašavati potencijalnu ulogu pohrane u obliku termalne energije – (eng. *Thermal Energy Storage* – TES). Iako se TES postrojenja u praksi većinski koriste u kombinaciji s postrojenjima koncentrirane sunčeve snage (eng. *Concentrated Solar Power* – CSP), postoji rastući broj istraživanja o samostalnim TES sustavima koji električnu energiju pohranjuju u obliku topline te je zatim ponovno pretvaraju u električnu energiju [2].

Upravo se takvi sustavi nazivaju Carnotove baterije. U Carnotovoj bateriji, električna energija na ulazu koristi se za uspostavljanje temperaturne razlike između dva spremnika, nisko-temperaturnog i visoko-temperaturnog [8]. Akumulirana toplina se pretvara natrag u električnu putem tradicionalnih energetske procesa (npr. Rankine, Brayton, itd...) [2]. Visokotemperaturni i nisko-temperaturni spremnici mogu biti stvarni fizički spremnici, ispunjeni plinom, kapljevnom ili krutim materijalom koji mijenjaju fazu [8]. Česta kombinacija da jedan od spremnika nedostaje, najčešće je to hladniji spremnik, a njegovu ulogu preuzima okoliš. [8] U praksi se za punjenje koristi električna energije korištenjem Jouleovog efekta. Konkretno, Jouleov efekt je proces u kojem se električna energija koristi za zagrijavanje vodiča (koji posjeduje određeni otpor) kroz koji prolazi električna struja, što rezultira povećanjem

temperature tog vodiča. U Carnotovoj bateriji, ova toplinska energija nastala Jouleovim efektom koristi se za uspostavljanje temperaturne razlike između dva spremnika. Ovo je jedna od metoda punjenja, uz alternativne metode koje koriste ljevokretne kružne procese, ali su rjeđe u praksi.

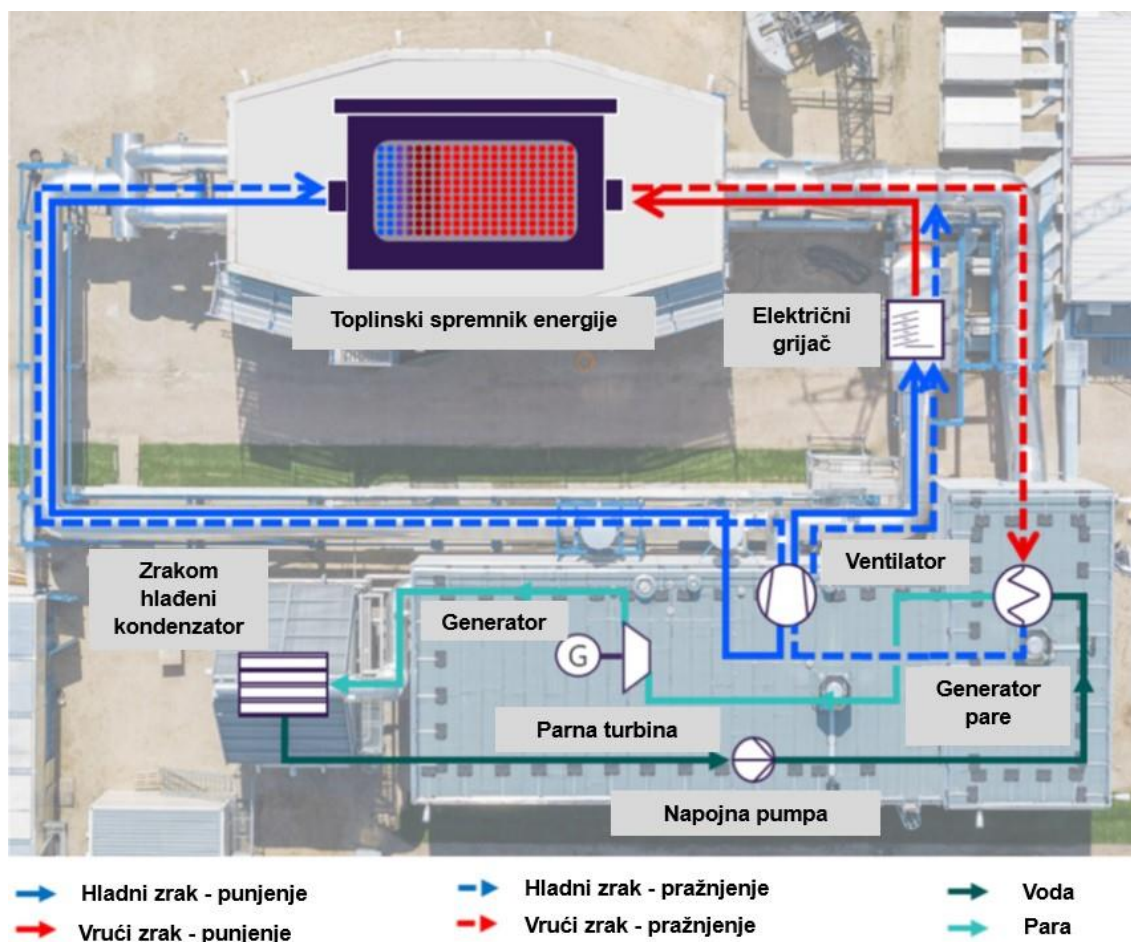
Apsorbirani specifični rad povećava se što je veća razlika u temperaturi između visokotemperaturnog i nisko-temperaturnog spremnika i obrnuto. Dodatni toplinski izvori i ponori mogu se iskoristiti za prilagodbu radnih temperaturnih razlika tijekom procesa punjenja i pražnjenja. Dodavanje dodatnih izmjenjivača topline može značajno unaprijediti performanse Carnotove baterije u smislu električne efikasnosti [8]. Carnotove baterije mogu uključivati toplinske pumpe i motore, sastavljene od komponenti kao što su pumpe, kompresori, ekspanzijski ventili, izmjenjivači topline i turbine. Zbog njihove lakoće skaliranja, Carnotove baterije predstavljaju potencijalnu alternativu reverzibilnim hidroelektranama, iako s nešto nižom učinkovitošću [8].



Slika 1 Pojednostavljena shema sustava Carnotove baterije [2]

Električna energija proizvedena iz obnovljivog izvora energije može se prodavati u mrežu ili slati u sustav Carnotove baterije. Akumulacija topline se vrši kad postoji lokalni višak električne energije, kad su cijene električne energije niske ili čak negativne (slučaj kada postrojenje sudjeluje na slobodnom tržištu), što je već počeo biti česti slučaj. U budućnosti će biti, sve većom integracijom OIE, više slučajeva negativnih cijena električne energije. Također, akumulacija se vrši kada je dostupna otpadna toplina iz industrijskog procesa. S druge strane, proces pražnjenja izvršava se kad postoji potreba za električnom energijom (proizvodnja nije dovoljna lokalno da zadovolji potrebe) ili kad su cijene električne energije visoke.

Primjer jednog takvog postrojenja nalazi se u Hamburgu u Njemačkoj. Postrojenje, pušteno u pogon 2019. godine, ima ukupnu snagu od 5,4 MW i kapacitet termalne pohrane veći od 100 MWh. Sastoji se od dva odvojena sustava: zatvorenog zračnog sustava i Rankineovog parnog sustava.



Slika 2 Prikaz postrojenja za pohranu energije u Hamburgu [9]

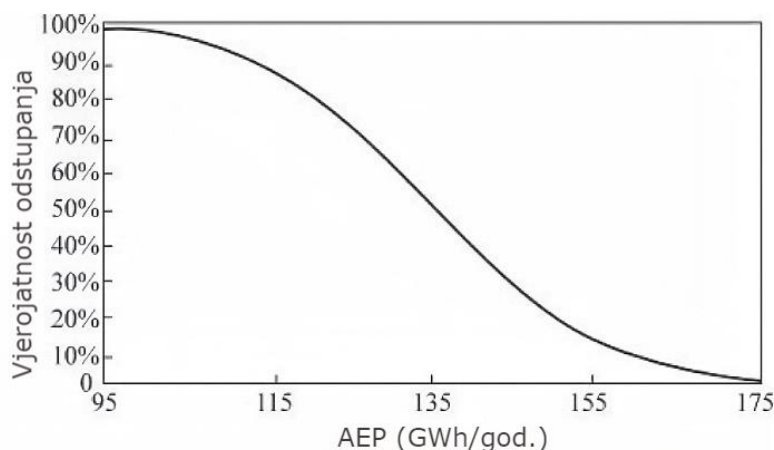
Ventilator dovodi zrak pri atmosferskom tlaku, s masenim protokom do 45 t/h, kroz električni grijač koji zagrijava zrak na potrebnu temperaturu punjenja. Zrak zatim prolazi kroz toplinski spremnik, zagrijavajući vulkanske stijene na optimalnu temperaturu koja se kreće 650 – 720 °C. Vanjske dimenzije toplinskog spremnika su 11 m širine, 22 m dužine i 10 m visine, s volumenom od približno 700 m<sup>3</sup>.

Tijekom pražnjenja, zrak se preusmjerava prema hladnijoj strani spremnika, gdje se postepeno zagrijava prije nego što uđe u generator pare na otpadnu toplinu (eng. *Heat recovery steam generator* – HRSG). Generator pare proizvodi 6,9 t/h pregrijane pare pri tlaku od 67 bara i temperaturi od 480 °C, koja pokreće turbinu snage 1,4 MW.

### 3. PROJEKTIRANJE VJETROELEKTRANE

Projektiranje vjetroelektrane (VE) predstavlja složen proces koji uključuje analizu brojnih faktora kako bi se osigurao optimalan dizajn i isplativost projekta. Danas se meteorologija energije vjetra opisuje kao primijenjena geofizika i dinamika fluida, u kombinaciji meteorologije i primijenjene klimatologije [10]. U posljednjem desetljeću, vjetroagregati (VA) su značajno porasli u veličini i visini, što znači da su izloženi mnogo složenijim strukturama atmosferskog graničnog sloja. Činjenica da se VA obično postavljaju u složenim terenskim uvjetima, pa čak i na moru, dodatno je potaknula razvoj ove discipline.

Područje procjene potencijala vjetra treba obuhvaćati analizu podataka o vjetru, analizu lokacije, odabir VA, postavljanje VA, tj. mikrolociranje, modeliranje strujanja vjetra, procjena proizvodnje energije, optimizacija VE i analizu nesigurnosti [11]. Iz ovog rada će biti izostavljena analiza nesigurnosti jer cilj rada nije dobiti što točniju vjerojatnost proizvodnje već modelirati ponašanje spremnika topline za skladištenje električne energije koju proizvodi VE. Također, analiza nesigurnosti se izvodi na kraju procjene potencijala vjetra te predstavlja nesigurnost svih segmenata koji rezultiraju izračunom finalne proizvodnje. Tu pripadaju mjerenja i način montiranja senzora za mjerenja parametara vjetra, pa sve do primjene odgovarajućih metoda i alata za modeliranje. Analiza nesigurnosti od posebnog je značaja u financijskom dijelu projekta (banke) prilikom odobravanja kredita investitoru za projekt VE.



**Slika 3** Primjer krivulje očekivane godišnje proizvodnje električne energije (AEP) u odnosu na vjerojatnost odstupanja u Gaussovoj distribuciji [11]

Idealna lokacija za izgradnju VE trebala bi imati visok potencijal energije vjetra, pristupačnost elektroenergetske mreže te biti prihvatljiva s aspekta zaštite okoliša. Međutim, s obzirom na

rijetkost idealnih lokacija, nužno je pronaći kompromis i procijeniti ukupnu isplativost investicije u VE.

### 3.1. Općenito o pokrovu terena i orografiji

Bitan utjecaj na modeliranje i proizvodnju električne energije ima orografija i hrapavost terena, te blizina mjernog stupa (MS) i sličnost uvjeta (nadmorska visina, nagibi terena i sl.) na poziciji MS i pozicijama VA. Prema pravilnicima, preporučuje se da maksimalna udaljenost između VA i MS iznosi 10 km za jednostavne terene, dok je za složene terene ta udaljenost smanjena na 2 km [12]. Jednostavnost terena očituje se u izostanku primjetnih varijacija u visinskoj distribuciji. S druge strane, složeni teren odnosi se na lokaciju sa značajnim orografskim varijacijama i velikim nagibima. Prilikom strujanja vjetra u području jednostavnog terena, vjetar se kreće relativno neometano, a glavnu ulogu u oblikovanju vjetropotencijala i graničnog sloja vjetra ima hrapavost terena, odnosno vrsta i gustoća vegetacije i drugih prepreka na tlu. U takvim uvjetima, modeliranje vjetra je jednostavnije i preciznije jer su u pravilu turbulencije niže, a strujanje zraka je ujednačenije.



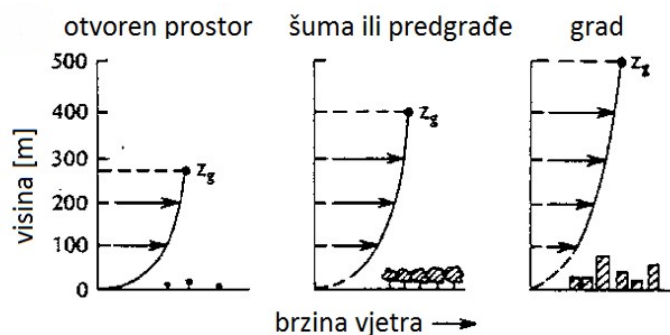
Slika 4 Primjer jednostavnog terena [12]

Međutim, u složenom terenu, značajne varijacije u visini i nagibi terena uzrokuju složenije strujanje zraka. Vjetar u takvim uvjetima doživljava intenzivnije turbulencije i promjene u brzini i smjeru zbog orografskih prepreka kao što su brda, planine i doline. Nagib terena od  $17^\circ$  koristi se kao granica za razlikovanje jednostavnog i složenog terena u kontekstu modeliranja vjetra [12]. Prilikom većih nagiba, dolazi do značajnijih promjena u strujanju zraka, što uzrokuje složenije uvjete koje je teško modelirati jednostavnim matematičkim metodama.



Slika 5 Primjer složenog terena [12]

Kao što je jasno iz prethodnog, topografija terena, koja uključuje orografiju (visinsku raspodjelu terena) i pokrov (hrapavost terena), igra ključnu ulogu u oblikovanju vertikalnog profila vjetra. Na većim visinama, udaljavajući se od tla gdje su razne prepreke, poput stabala ili zgrada, brzina vjetra raste, turbulentnost se smanjuje. Iz prethodno rečenog se zaključuje, da je intenzitet turbulencije najveći u blizini površine. Na sljedećoj slici može se primijetiti da brzina vjetra na manje hrapavim površinama postiže veće brzine na nižim visinama nego na područjima veće hrapavosti. Zbog toga se VE obično postavljaju daleko od urbanih područja, u ruralnim ili morskim sredinama.



Slika 6 Utjecaj različitih veličina hrapavosti terena na vertikalni profil vjetra [13]

Hrapavost površine, označena kao  $z_0$ , je parametar koji opisuje visinu iznad tla na kojoj je srednja brzina vjetra jednaka nuli [14]. Ovaj parametar ima empirijsko porijeklo, što znači da je do njega došlo kroz promatranje i mjerenje stvarnih uvjeta na terenu. Sljedeća tablica prikazuje najčešće slučajeve tipova terena s pripadajućim vrijednostima aerodinamičke duljine hrapavosti.



**Tablica 1 Hrapavosti površine za različite tipove terena [15]**

| <b>TIP TERENA</b>  | <b>z<sub>0</sub>, m</b> |
|--|-------------------------|
| More i obalna područja uz otvoreno more  | 0,003                   |
| Jezera i ravne površine bez značajnije vegetacije i prepreka   | 0,01                    |
| Područja s niskim raslinjem i malim brojem izoliranih prepreka (drveće ili građevine)                      | 0,05                    |
| Područje s ujednačenim pokrovom vegetacije ili građevina (kao što su sela, prigradski tereni, trajne šume) | 0,30                    |
| Područje u kojem je barem 15% površine pokriveno zgradama  | 1,0                     |

### 3.2. Općenito o mjernoj kampanji

Provedba mjerenja parametara vjetra je prvi ključni korak prema procjeni vjetropotencijala na određenom području za buduće VE. Opći cilj mjerenja podataka o vjetru je pružiti najreprezentativnije podatke koji horizontalno pokrivaju cijelo promatrano područje, te vertikalno obuhvaćaju barem dvije trećine visine osi rotora razmatranih VA [12]. To se postiže, u najvećem broju slučajeva, postavljanjem MS. Kako bismo odredili je li mjerni sustav reprezentativan za lokaciju VA, primjenjujemo načelo sličnosti [10]. Načelo sličnosti između MS i VA određujemo prema: udaljenosti MS i VA koje je opisano u prethodnom poglavlju, atmosferskoj stabilnosti, nadmorskoj visini, lokalnoj kompleksnosti terena, hrapavosti površine i udaljenosti od linije promjene visine hrapavosti [10]. Mjerenja se provode na različitim visinama kako bi se mogao izračunati vertikalni profil vjetra.

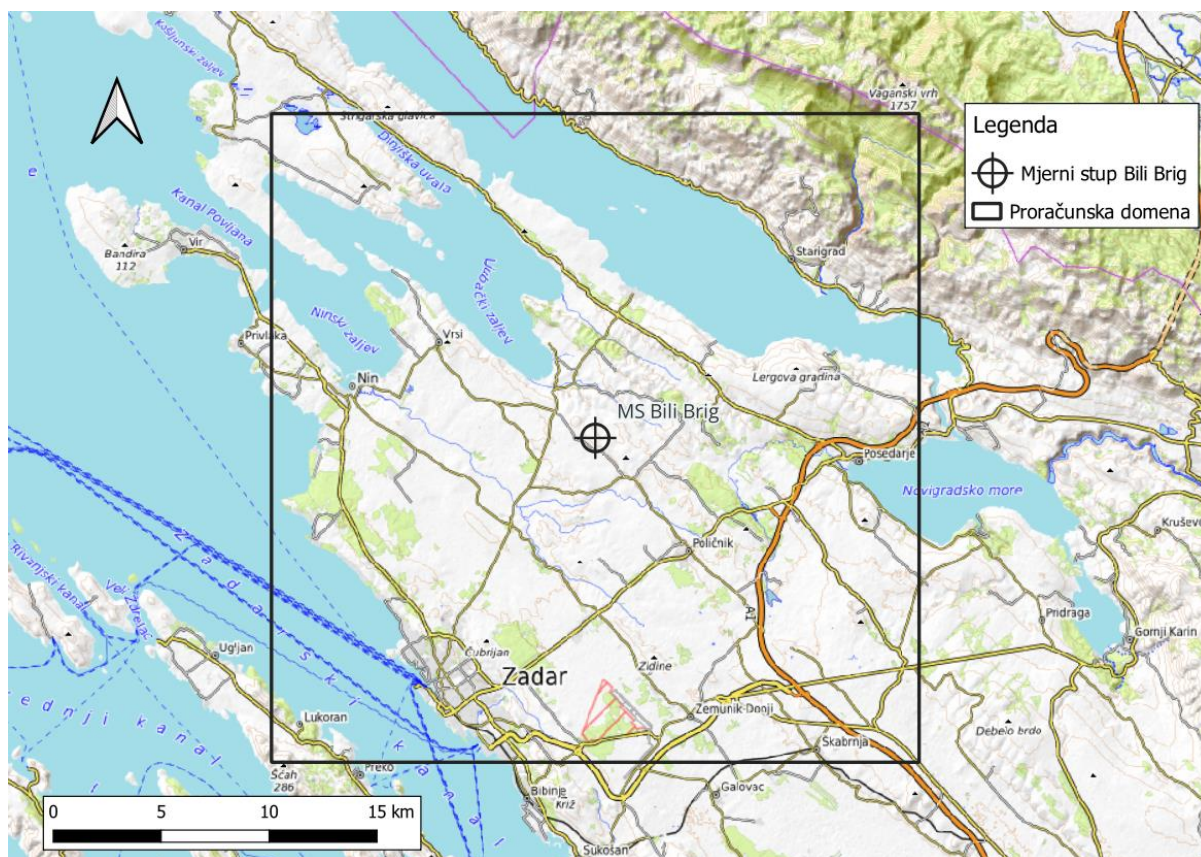
Mjerenje temperature i tlaka zraka od iznimne je važnosti jer pruža ključne informacije o gustoći zraka, što omogućuje daljnje modeliranje proizvodnje električne energije. Dodatno, ovisno o lokalitetu i klimi, poželjno je imati i mjerenja relativne vlažnosti zraka koja također utječe na gustoću zraka (npr. tropska klima u kojoj je velika vlažnost).

Kroz korištenje dva senzora za mjerenje temperature postavljenih na različitim visinama, dobivamo podatke o termalnoj stabilnosti atmosfere. Dobivene informacije o termalnoj stabilnosti pomažu nam u analizi vertikalnih profila brzine vjetra.

### 3.3. Projektiranje VE Bili Brig

#### 3.3.1. Opis mjerne lokacije i mjerni podaci

Mjerenja meteoroloških parametara za procjenu potencijala energije vjetra na lokaciji Bili Brig u Zadarskoj županiji započela su u srpnju 2009. godine u svrhu izrade baze podataka za „Atlas vjetra Zadarske županije“. Lokacija MS prikazana je na sljedećoj slici.



Slika 7 Lokacija MS Bili Brig zajedno s proračunskom domenom 30 x 30 km

Tablica 2 Opis proračunske domene

| Točka        | X (eng. easting) | Y (eng. northing) | Koordinatni sustav   |
|--------------|------------------|-------------------|----------------------|
| Jugoistok    | 510923           | 4881495           | WGS 84/ UTM zona 33N |
| Sjeverozapad | 540923           | 4911495           |                      |

Lokacija se nalazi 12-ak kilometara sjeveroistočno od grada Zadra te 10-ak kilometara istočno od grada Nina.

MS je rešetkaste konstrukcije ukupne visine od 50 m, s postavljenim gromobranskim šiljkom, odnosno gromobranskim zaštitom. Mjerenje vjetra na MS izvodi se pomoću meteoroloških uređaja postavljenih na 3 visine; 10, 30 i 49 m. Na lokaciji se prikupljaju podaci o brzini vjetra,

smjeru, temperaturi zraka, tlaku zraka, relativnoj vlažnosti. Zbog praktičnosti prilikom modeliranja i ograničenja računalnih programa, uzet je period mjerenja od 4 godina.

**Tablica 3** Glavne karakteristike mjerenja parametra vjetra na MS Bili Brig

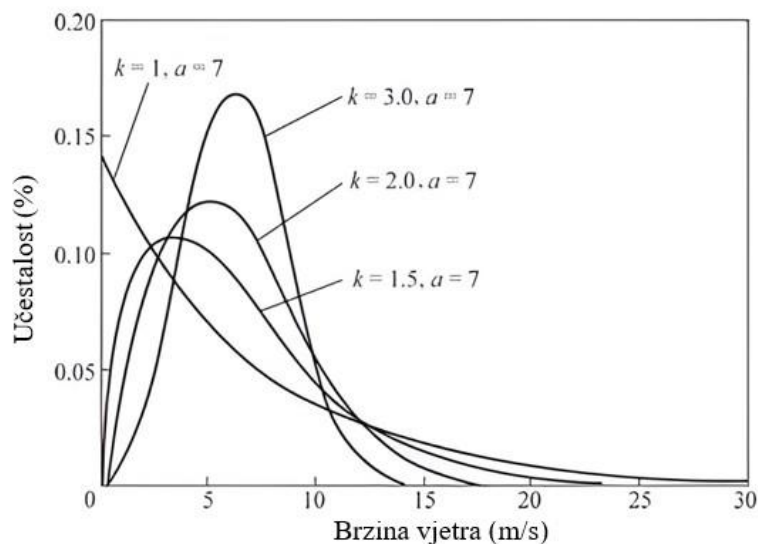
|                            |   |
|----------------------------|---|
| Početak razdoblja mjerenja | 1. siječanj 2020.                                       |
| Kraj razdoblja mjerenja    | 31. prosinac 2023.                                      |
| Visine na kojima se mjeri  | Brzina vjetra: 49, 30 i 10 m<br>Smjer vjetra: 49 i 10 m |
| Koordinate mjernog stupa   | Lat. = 44,221226°, Long. = 15,324547°                   |
| Nadmorska visina           | 120 m   |

Vrijeme mjerenja mora trajati minimalno godinu dana kako bi se obuhvatila sezonalnost vjetra, a raspoloživost podataka mora biti veća od 90 % kako bi se održala reprezentativnost [12].

Za analizu prikupljenih podataka, koristio se računalni program *Windographer*. Nakon uspješnog uvoza podataka, program automatski generira informativne grafičke prikaze, uključujući ružu vjetrova, vertikalni profil vjetra, te mjesečne i dnevne srednje vrijednosti brzina vjetra.

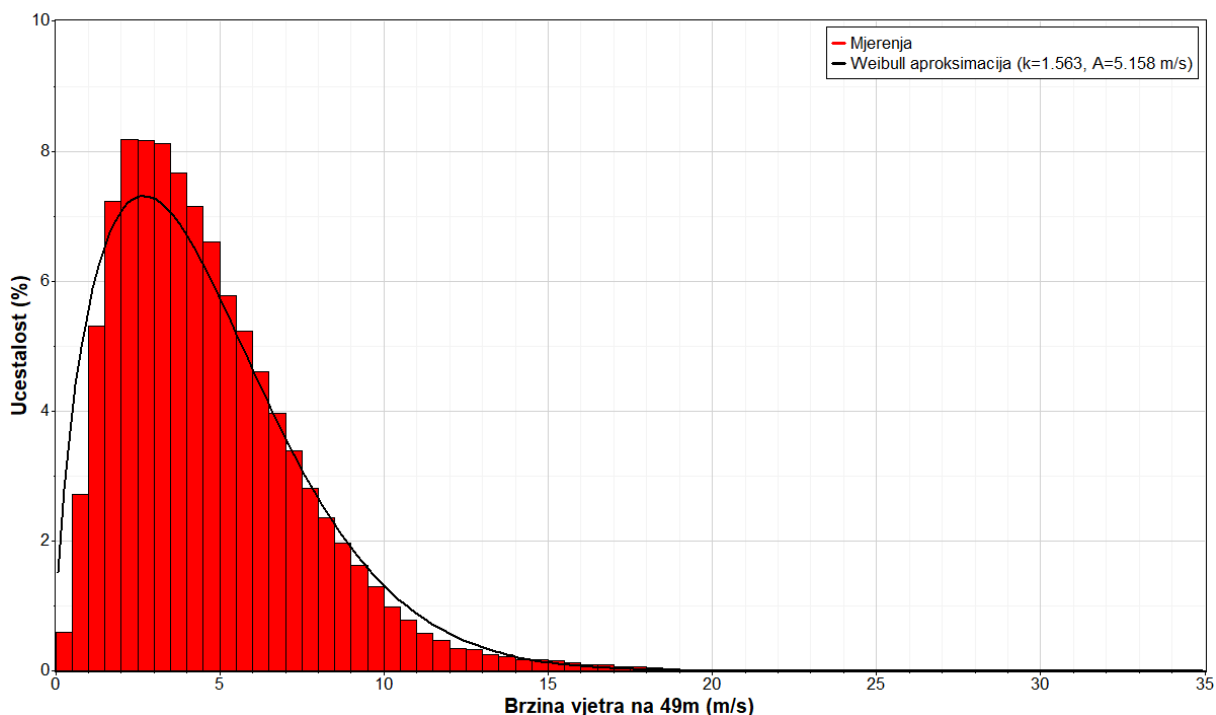
Nakon unosa sirovih podataka, neophodno je provesti proces filtriranja kako bismo osigurali preciznost i pouzdanost analize te eliminirali neispravna očitavanja pojedinih senzora. Izvori neispravnosti mogu biti različiti, od zaleđivanja uređaja (što ovdje nije slučaj), unosa krivih kalibracijskih parametara, otklona, kvara senzora uslijed ekstremnih vremenskih uvjeta koji često oštete pojedine senzore (npr. udar groma) i dr. Ovaj korak u analitičkom procesu ima ključnu ulogu u eliminiranju potencijalno netočnih podataka koji proizlaze iz otežanih uvjeta mjerenja. Također, pogreškama u mjerenjima smatraju se vremenski intervali u kojima mjerni uređaju pokazuju vrijednosti koji nisu realni.

S obzirom na karakteristike raspona srednje brzine vjetra, dvoparametarska Weibullova distribucija, nazvana prema švedskom matematičaru Waloddi Weibullu, ističe se kao najprikladniji grafički prikaz. Weibullova distribucija pruža vizualnu reprezentaciju frekvencije vjetra pri određenoj brzini tijekom proširenog vremenskog razdoblja. Dva parametra koja definiraju ovu distribucije su: parametar oblika  $k$  i parametrom razmjera  $A$ . Sljedeća slika pokazuje utjecaj parametara  $k$  na izgled krivulje.



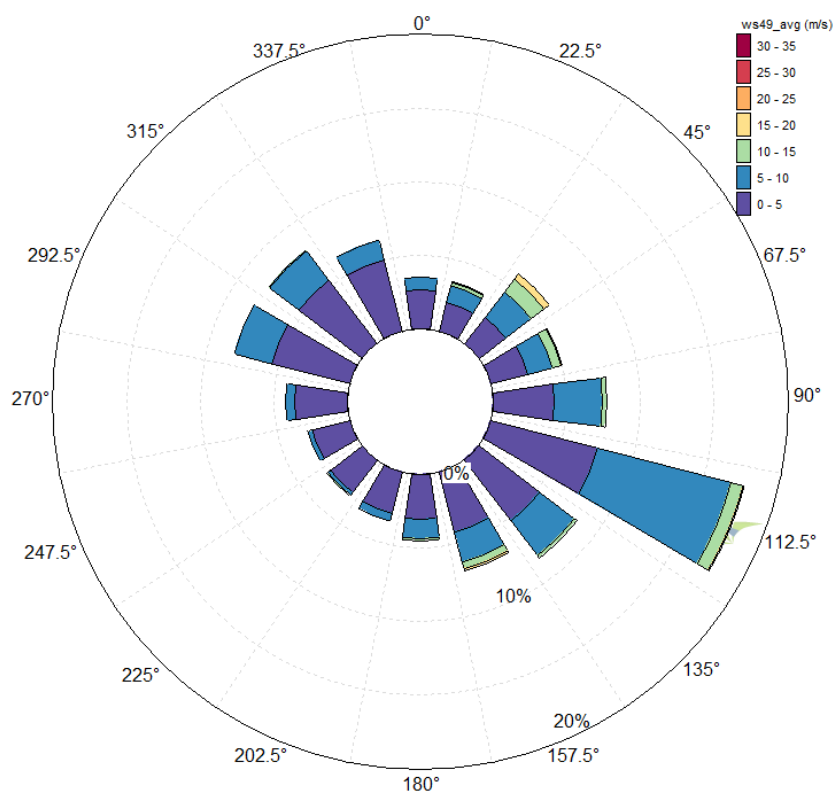
Slika 8 Utjecaj parametra  $k$  na izgled krivulje [10]

Vrh Weibullove funkcije smješten je na lijevoj strani srednje vrijednosti, što znači da su brzine vjetra vjerojatnije niže od srednje vrijednosti, dok se duga repa s desne strane približava nuli kako brzina vjetra raste. Histogram brzine vjetra prikazuje stvarnu učestalost brzina raspoređenih u intervale, što napredniji alati poput *WindSima* i *Meteodyn*-a koriste za preciznu analizu. S druge strane, Weibullova aproksimacija s parametrima  $k$  i  $A$  pojednostavljuje te podatke, ali ponekad ne odgovara stvarnim mjerenjima prikazanim histogramom, što može rezultirati netočnim rezultatima. Sljedeća slika prikazuje histogram zajedno s Weibull aproksimacijom na mjernoj lokaciji.



**Slika 9** Dijagram učestalosti brzine na mjernoj lokaciji Bili Brig zajedno s Weibull aproksimacijom

U ovom slučaju, postoji vrlo dobro poklapanje između histograma i Weibullove aproksimacije. Osim prikazivanja podataka o vjetru u obliku histograma, često se koristi i ruža vjetrova, koja pruža vizualni prikaz smjera i frekvencije vjetra. Ruža vjetrova grafički prikazuje kako se smjer vjetra mijenja tijekom određenog razdoblja, omogućujući bolju analizu i razumijevanje distribucije vjetra na određenoj lokaciji. Ovaj prikaz je osobito koristan za planiranje i optimizaciju postavljanja VA jer jasno pokazuje dominantne smjerove vjetra i njihovu učestalost.



Slika 10 Frekvencijska ruža vjetrova na mjernoj lokaciji Bili Brig

Ova lokacija ne pokazuje karakterističnu ružu vjetra koja se obično očekuje u Dalmaciji i priobalju. Izraženi smjerovi bure i juga, dva tipična vjetra na našem području, ovdje su manje prisutni. Međutim, svaka lokacija je specifična i uvijek postoje izuzeci. Na ovom mjestu, jugo je prisutno, ali njegov smjer varira ovisno o dijelu Dalmacije. Ponekad jugo puše iz smjera 120°, dok se u drugim slučajevima strujanje može zakrenuti na smjerove između 150° i 180°. U ovom specifičnom području jedino izostaje bura, što dodatno naglašava jedinstvenost lokalnih uvjeta.

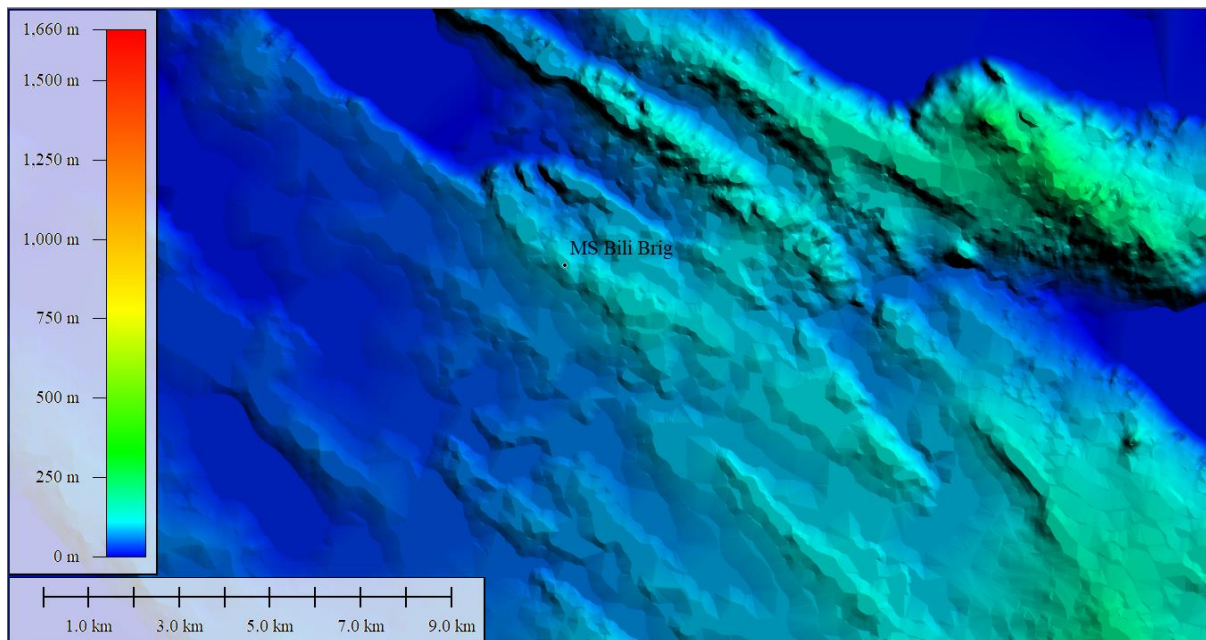
### 3.3.2. Izrada topografije

Kao što je jasno iz već rečenog, topografija terena, koja uključuje orografiju i pokrov, igra ključnu ulogu u oblikovanju resursa vjetra.

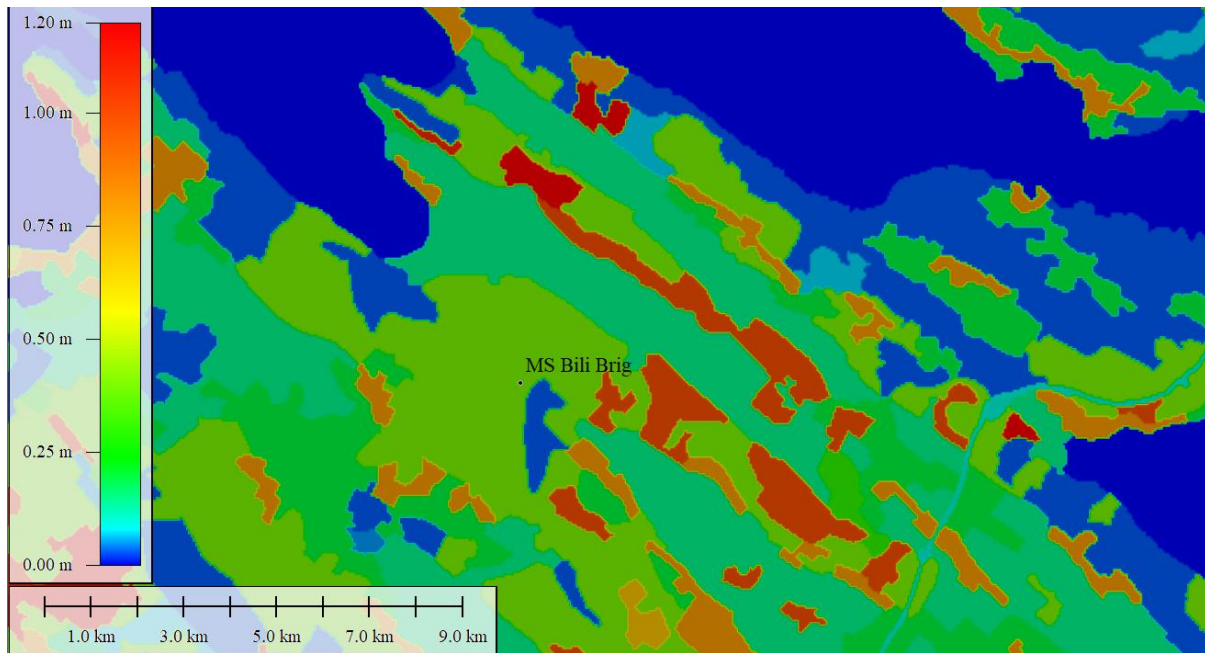
Mjerenjem potencijala vjetra na MS dobivamo podatke o lokalnoj vjetroklimi, ali ti podaci odnose se samo na uže područje na mjestu i oko MS (ovisno o reprezentativnom području). Da bismo dobili informaciju o brzini, smjeru vjetra i iznosu gustoće na poziciji i visini pojedinih VA u blizini, nužno je provesti vertikalnu i horizontalnu ekstrapolaciju. Horizontalna i

vertikalna ekstrapolacija zahtijevaju poznavanje topografije promatrane domene, unutar koje želimo izračunati proizvodnju električne energije.

U procesu modeliranja topografije terena koristili su se programi; *QGIS*, besplatni softver za geografski informacijski sustav (GIS) i *Global Mapper v25.1*. Oba programa omogućuju korisnicima modeliranje i analizu prostornih podataka, uključujući topografske informacije. U procesu modeliranja obično se koriste različiti podaci o nadmorskoj visini i digitalnim modelima terena (DTM).



**Slika 11 Orografija terena dobivena iz EU-DEM digitalnog modela terena (teren je modeliran u *Global Mapper-u*) [16]**



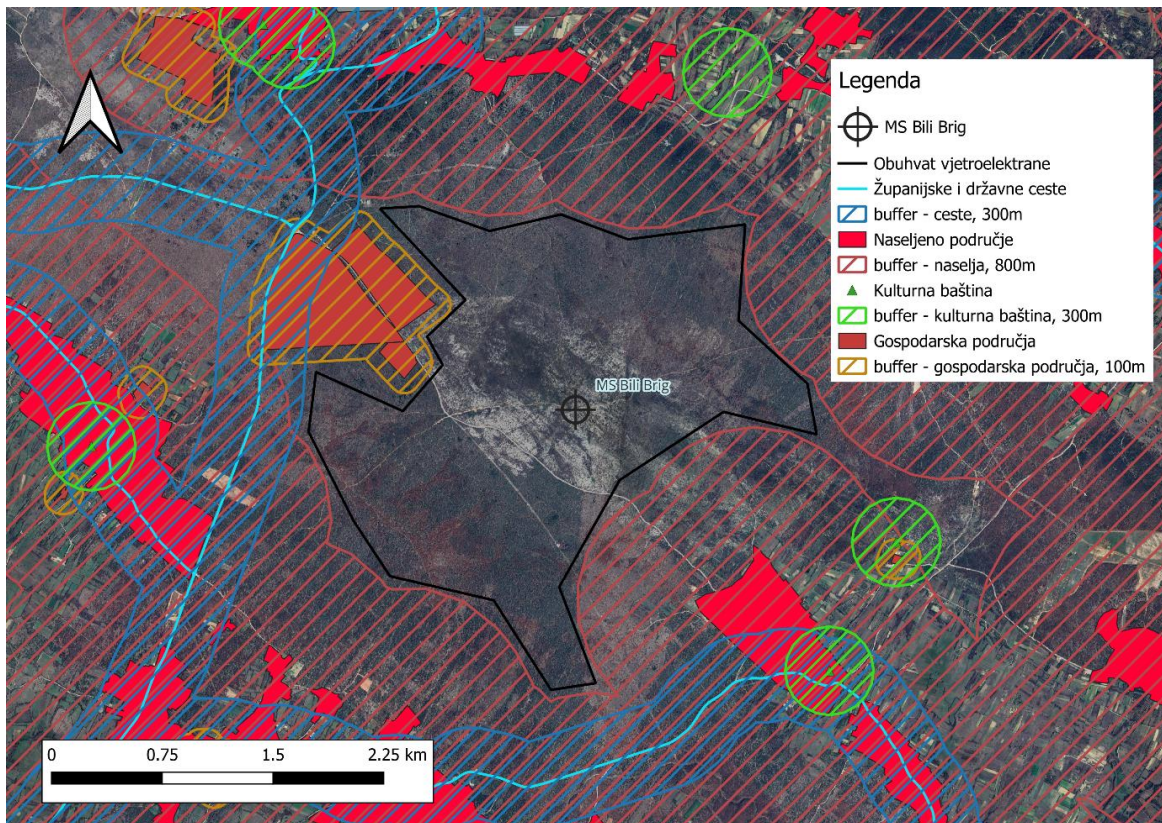
Slika 12 Hrapavost površine dobivena iz baze podataka Corine (CLC 2018) (teren je modeliran u *Global Mapper-u*) [17]

### 3.3.3. Ograničenja i obuhvat VE Bili Brig

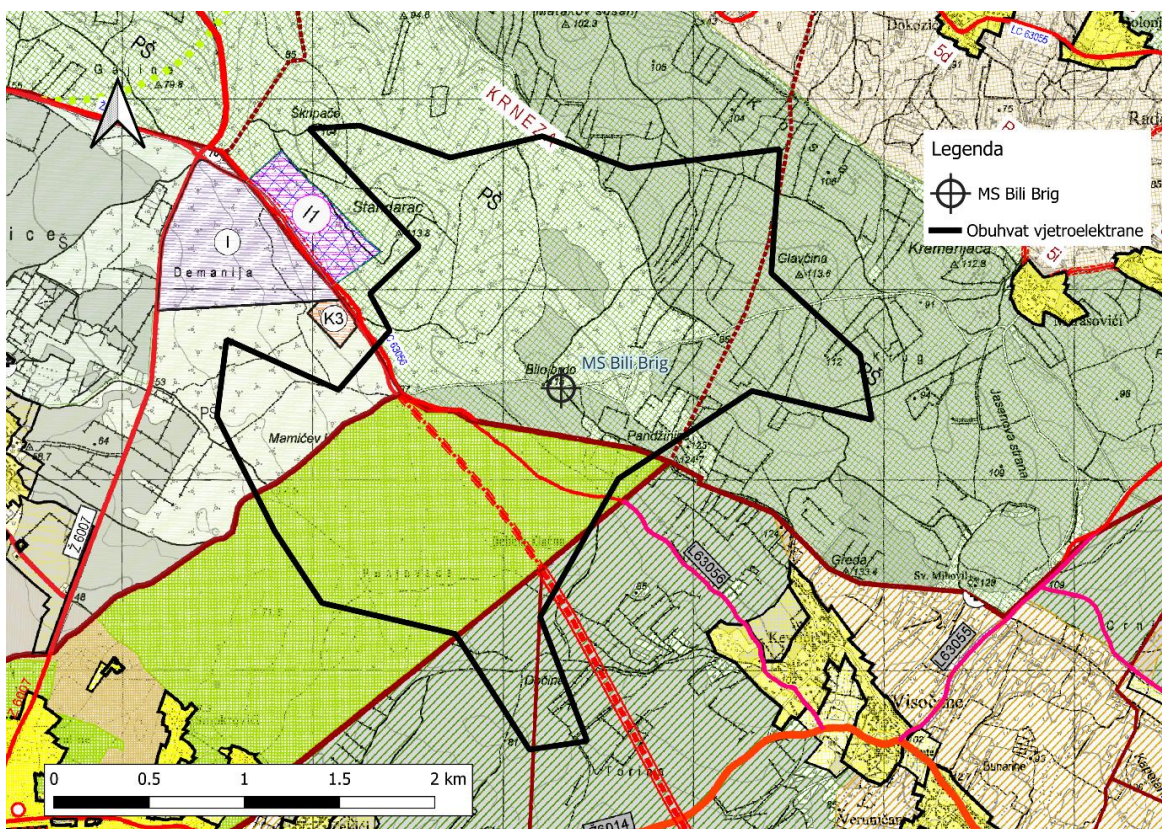
Kako bi se definirao obuhvat VE, potrebno je uzeti u obzir različita ograničenja na lokaciji. Definiran obuhvat VE određuje granice područja unutar kojih je moguće postaviti VA. Ovo područje mora biti dovoljno veliko da omogućava smještaj planiranog broja VA, uzimajući u obzir sve tehničke i ekološke zahtjeve. Minimalne udaljenosti od glavnih cesta i naseljenih područja su neophodne kako bi se smanjio utjecaj buke i treperenja (eng. *Noise and flickering shadows*) na lokalno stanovništvo i osigurala sigurnost. Ograničenja s aspekta zaštite okoliša uključuju zaštitu staništa, ptica i drugih divljih životinja, te minimiziranje negativnih utjecaja na lokalni ekosustav.

Ograničenja na kojima se temelji prikazan raspored su poštivanje svih minimalnih udaljenosti propisanih u prostornom planu PP Zadarska [18]; udaljenost od najbližih županijskih i državnih cesta te nalazišta kulturne baštine – 300 m, udaljenost od građevinskog područja naselja – 800 m, udaljenost od područja za gospodarsku namjenu – 100 m.





Slika 13 Prikaz ograničenja i obuhvata VE na lokaciji

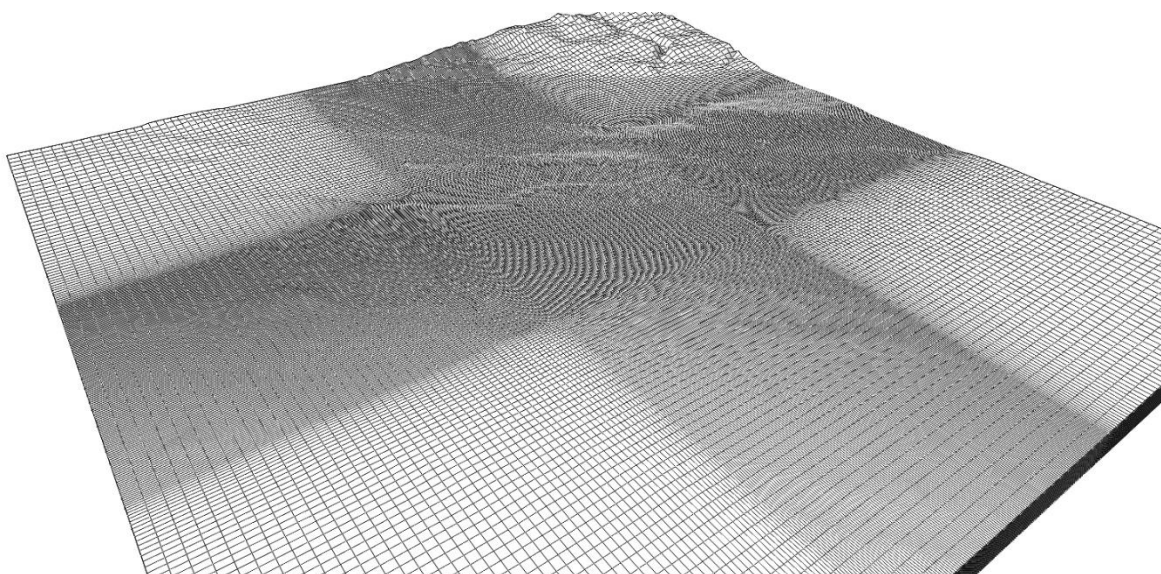


Slika 14 Obuhvat VE Bili Brig s prikazom prostornog plana kao podlogom

### 3.3.4. Modeliranje računalnim programom *WindSim*

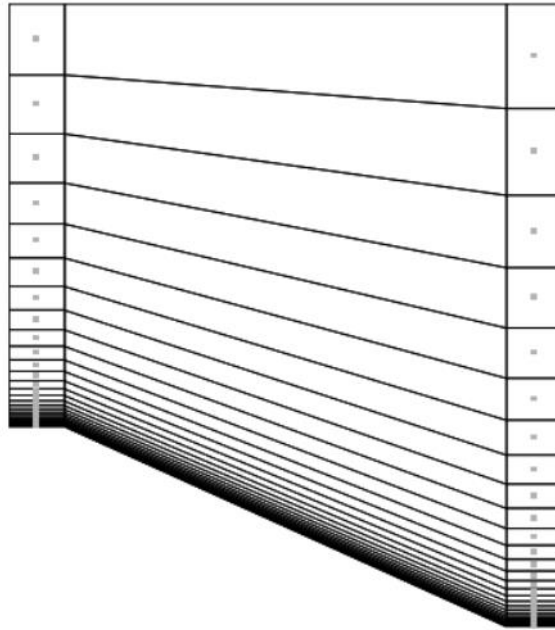
Za izradu tehničke analize korišten je računalni program *WindSim*. *WindSim* je softverski alat za simulaciju vjetra koji koristi računalnu dinamiku fluida (eng. *Computational Fluid Dynamics* – CFD) za analizu i optimizaciju projekata VE. Temelji se na numeričkom rješavanju nelinearnih transportnih jednadžbi mase i količine gibanja (eng. *Reynolds-averaged Navier-Stokes equations* – RANS), te energije.

Prvi korak u programu je unos podataka o terenu i stvaranje mreže kontrolnih volumena. Prilikom stvaranja mreže, važno je obratiti pažnju na veličinu i finoću mreže kako bi se postigla mrežna neovisnost, a istovremeno osiguralo da mreža nije previše zahtjevana za računalo. Također, potrebno je pažljivo odrediti veličinu proračunske domene kako bi se eliminirao utjecaj rubnih uvjeta na područje gdje planiramo postaviti VA.



**Slika 15** Prikaz mreže kontrolnih volumena

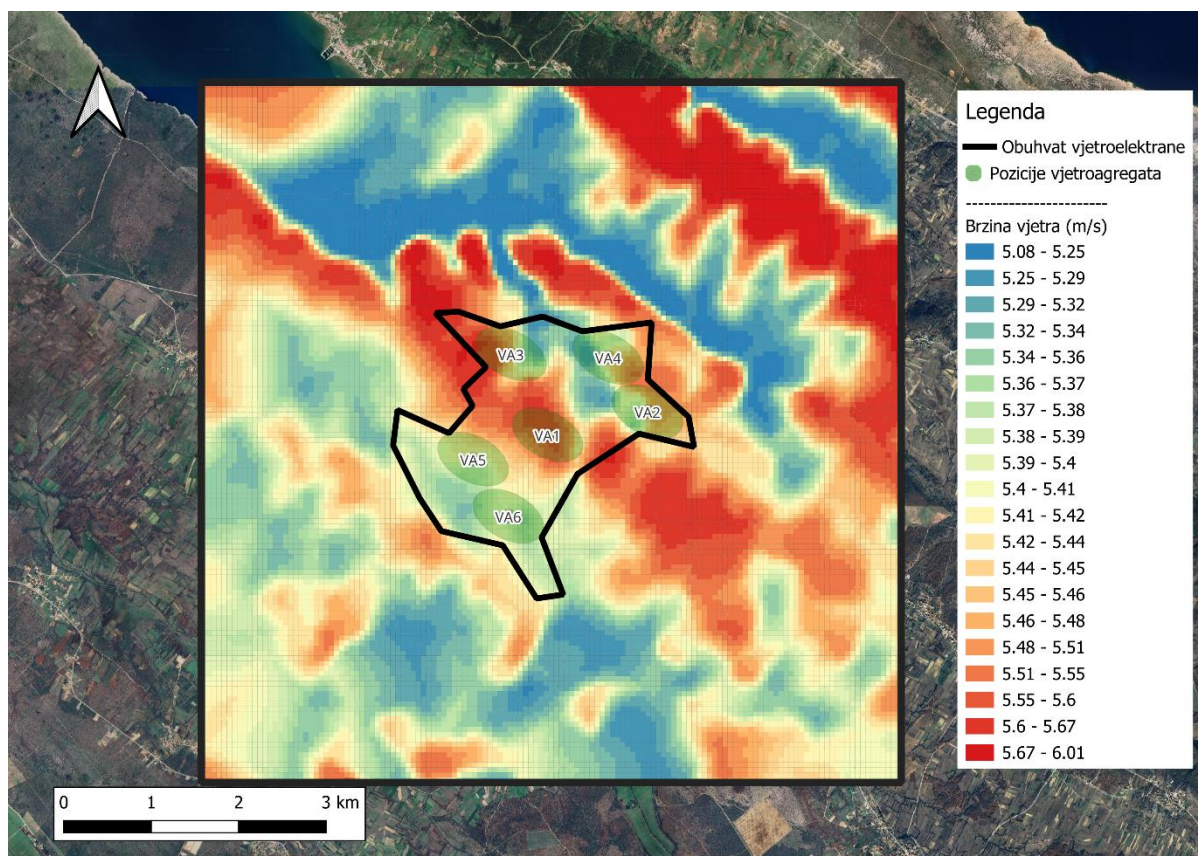
Mreža se sastoji od 1 749 660 kontrolnih volumena. Područje koje nam je od najvećeg interesa, diskretizira se finijom rezolucijom. Diskretizaciju je potrebno provesti i u vertikalnom smjeru.



**Slika 16** Prikaz vertikalne diskretizacije

Nakon postavljanja mreže kontrolnih volumena, sljedeći korak je definiranje rubnih uvjeta. Visina graničnog sloja određena je na 500 metara prema početnim zadanim postavkama, dok je brzina vjetra izvan graničnog sloja, koji više nije pod utjecajem terena, postavljena na 10 m/s. Rubni uvjet na vrhu proračunske domene je *Fixed pressure*. Za modeliranje turbulencije korišten je standardni *k-epsilon* model.

Na temelju rezultata simulacije izrađena je resursna karta vjetra. Ova karta omogućuje određivanje optimalne konfiguracije VA. Napravljeno je nekoliko konfiguracija VA, te je izabrana ona konfiguracija koja omogućuje maksimalnu proizvodnju električne energije uz minimalne gubitke uzrokovane položajem turbina u zavjetrini.



Slika 17 Resursna karta vjetra i odabrana konfiguracija VA

Raspored i broj VA unutar VE ovise o nekoliko ključnih faktora koji su od presudne važnosti za učinkovitost, sigurnost i usklađenost s propisima. Broj, snaga, dimenzije i tip VA koji se razmatraju za postavljanje također imaju važnu ulogu.

Maksimalni nagib terena također je važan jer preveliki nagibi mogu otežati transport, instalaciju i održavanje VA te smanjiti njihovu učinkovitost.

Odabrana konfiguracija VE sastoji se od ukupno šest VA 6.X tehnologije. Nažalost, zbog ugovora o povjerljivosti s proizvođačem, nije moguće prikazati krivulju snage i potiska VA. Svaki od ovih agregata doprinosi maksimalnoj snazi cijele VE, koja iznosi oko 40 MW. Udaljenosti između pojedinih VA su prikazane na temelju elipse 5D/3D zakrenute u smjeru  $112,5^\circ$  (dominantni smjer vjetra). Visina osi rotora iznosi 120 m, dok je promjer rotora 170 m.

Tablica 4 Opis pozicija VA

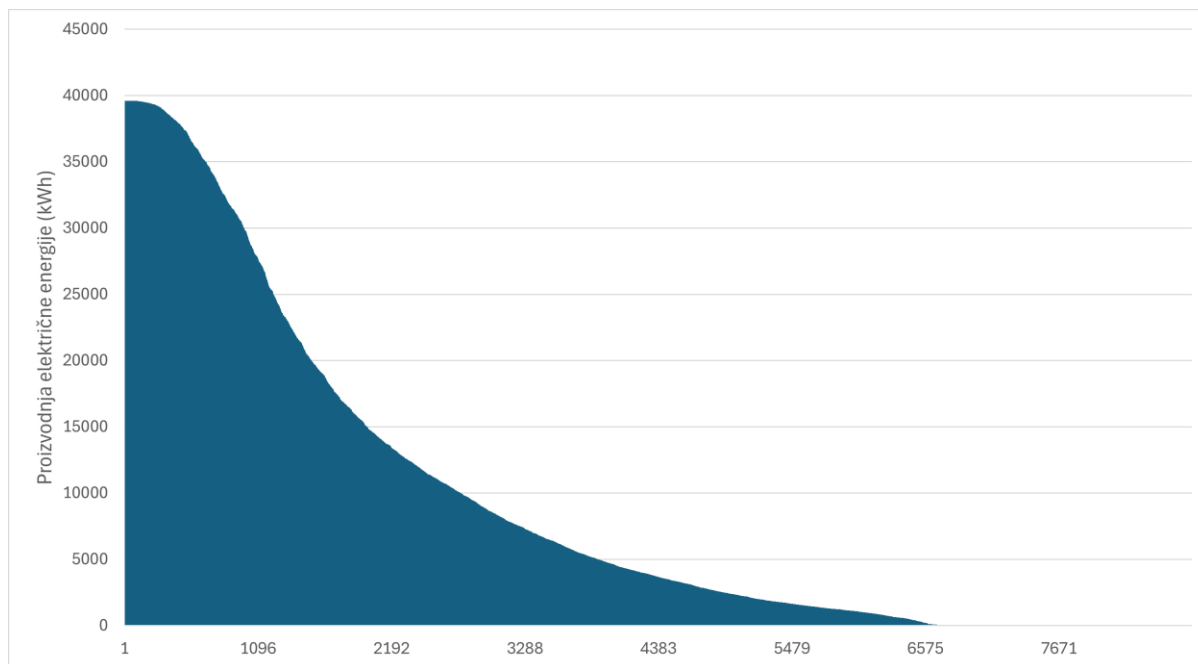
| ID  | Lat (°)  | Long (°) | x_utm33N (m) | y_utm33N (m) |
|-----|----------|----------|--------------|--------------|
| VA1 | 44,22097 | 15,32400 | 525881       | 4896468      |
| VA2 | 44,22333 | 15,33833 | 527024       | 4896734      |
| VA3 | 44,22929 | 15,31881 | 525462       | 4897390      |
| VA4 | 44,22893 | 15,33272 | 526573       | 4897354      |
| VA5 | 44,21850 | 15,31335 | 525030       | 4896190      |
| VA6 | 44,21263 | 15,31835 | 525432       | 4895539      |

Mjerni podaci imaju vremensku rezoluciju od 10 minuta, ali prije unosa podataka u program, svedeni su na satnu rezoluciju što znači da je svakom satu dodijeljena srednja vrijednost brzine i smjera vjetra. Na temelju tih podataka, modelirana je proizvodnja električne energije također na satnoj razini. Rezultati modelirane godišnje proizvodnje energije (eng. *Annual energy production* – AEP) prikazani su u tablici ispod.

Tablica 5 Rezultati proizvodnje električne energije

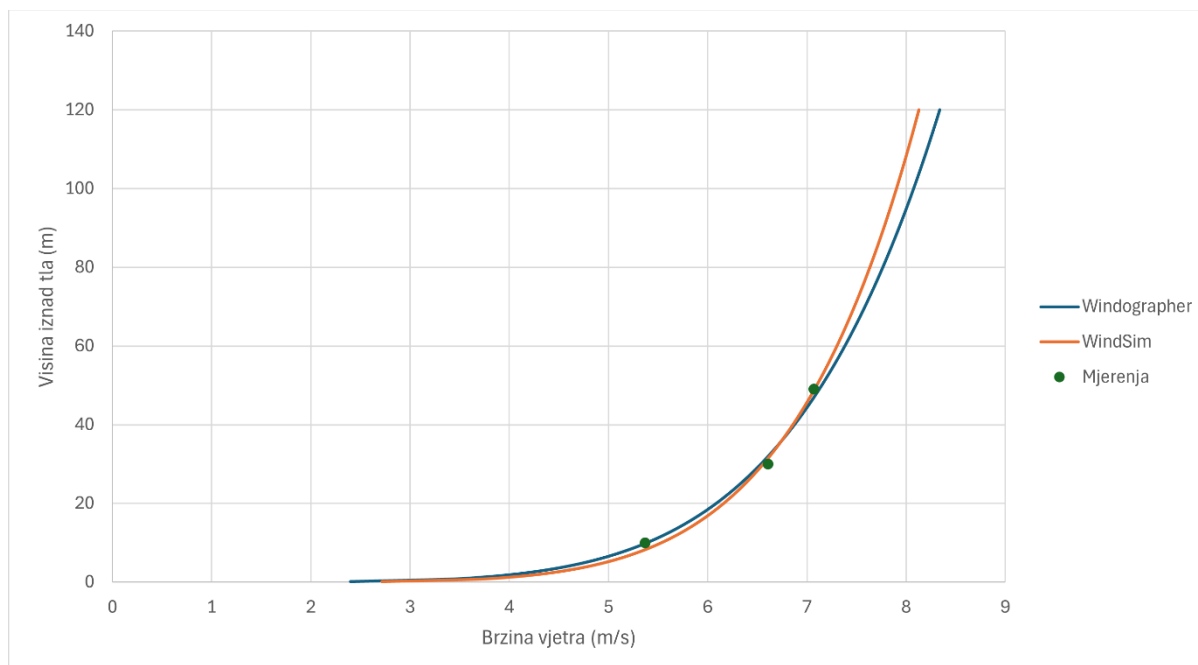
| ID                     | Gustoća snage<br>(W/m <sup>2</sup> ) | AEP – ukupno<br>(MWh) | AEP – wake<br>(MWh) | Wake<br>(%) |
|------------------------|--------------------------------------|-----------------------|---------------------|-------------|
| VA1                    | 804,1                                | 28031,2               | 27508,1             | 1,87        |
| VA2                    | 715,5                                | 26957,1               | 26496,7             | 1,71        |
| VA3                    | 725,3                                | 27248,9               | 26878,4             | 1,36        |
| VA4                    | 699,0                                | 26877,5               | 26494,5             | 1,42        |
| VA5                    | 707,9                                | 16722,0               | 26436,2             | 1,07        |
| VA6                    | 704,2                                | 26516,8               | 25947,8             | 2,15        |
| <b>Ukupno/Prosjeck</b> | 726,0                                | 162353,5              | 159761,7            | 1,60        |

Iz priloženih rezultata možemo vidjeti da je ukupna godišnja proizvodnja VE Bili Brig 159,76 GWh, sa prosječnim gubicima zavjetrine od 1,60%.

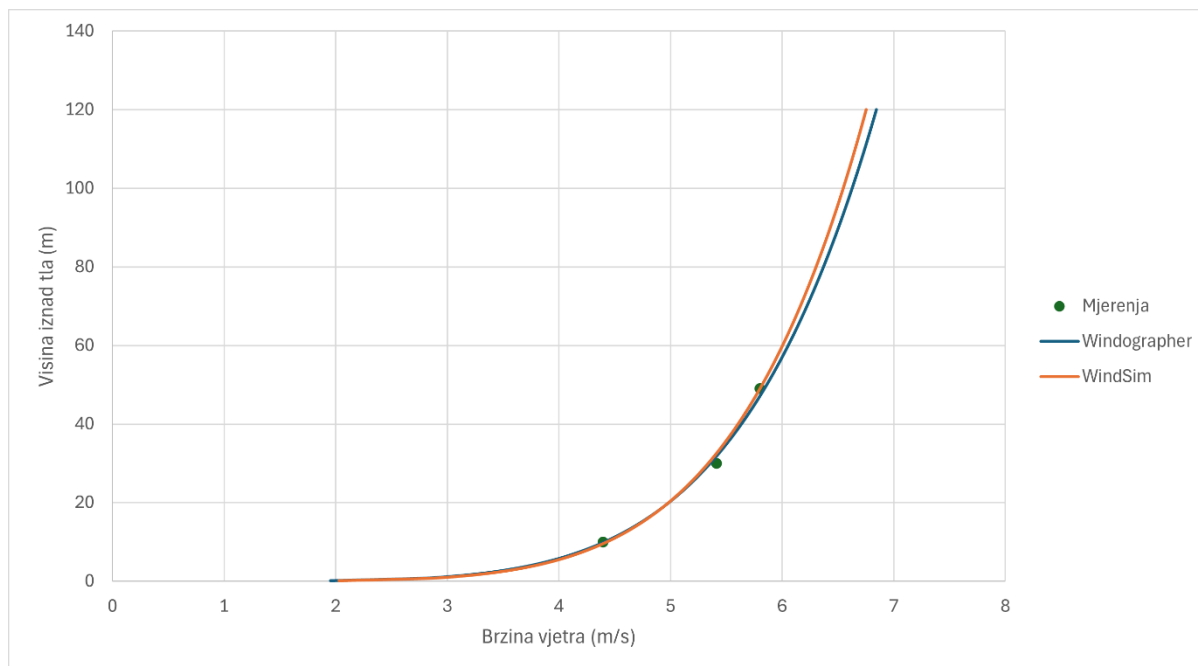


Slika 18 Krivulja trajanja proizvodnje električne energije dobivena simulacijom za 2022. godinu

Kako bi se provela validacija rezultata simulacije, potrebno je usporediti vertikalni profil vjetra mjerjenja vjetra na lokaciji Bili Brig i vertikalni profil dobiven simulacijom u programu *WindSim* za smjerove  $45^\circ$  i  $112,5^\circ$  koje su dominantni u proizvodnji energije. Sljedeće slike prikazuju usporedbu profila.



Slika 19 Usporedba vertikalnih profila simulacije i mjerjenja za sektor  $45^\circ$



Slika 20 Usporedba vertikalnih profila simulacije i mjerenja za sektor 112,5°

U oba slučaja može se zaključiti da simulacija prilično dobro modelira stvarna mjerenja vjetra, iako postoje manje razlike na višim visinama. *WindSim* lagano podcjenjuje potencijal vjetra na višim visinama na lokaciji, što dovodi do nižih procjena proizvodnje električne energije. Kako bi se poboljšala točnost modela simulacije, potrebno je uzeti u obzir uvjete atmosferske stabilnosti, koji u ovom slučaju nisu bili uključeni u analizu, a i koje je vrlo teško odrediti jer na lokaciji ne postoje mjerenja temperature na dvije visine (postoje i druge metode, ali najtočnija je mjerenja na dvije visine). Implementacija ovog dodatnog parametra pomaže u smanjenju razlika između simuliranih i stvarnih mjerenja, čime se povećava pouzdanost predviđanja proizvodnje energije.

#### 4. KONFIGURACIJA I PRORAČUN CARNOTOVE BATERIJE

Matematički model je napravljen u računalnom programu *MATLAB*. *MATLAB* je visoko interaktivni programski jezik i računalno okruženje koje se koristi za tehničke izračune, analizu podataka, razvoj algoritama i vizualizaciju podataka. Razvio ga je *MathWorks* i često se koristi u različitim znanstvenim, inženjerskim i matematičkim disciplinama [19]. *MATLAB*-ov dodatak *Simulink* pruža moćne alate za simulaciju i modeliranje dinamičkih sustava, što je posebno korisno u inženjerskim disciplinama. Sukladno rečenom, za rezultate simulacija korišten je *Simulink*. Jako korisna opcija je korištenje programskih biblioteka poput *CoolProp* i *XSteam*, koje se mogu integrirati unutar softverskog paketa. Ove biblioteke sadrže termodinamičke tablice s tabličnim vrijednostima vode, zraka i ostalih fluida. Pomoću poznavanja jedne ili dvije fizičke veličine, moguće je izračunati traženu fizikalnu veličinu, što uvelike olakšava iteracijski postupak.

Demonstracijsko postrojenje koje se analizira u ovom radu vrlo je slično i temelji se na postrojenju u Hamburgu, prikazanom u prethodnom poglavlju. Ovo postrojenje uključuje nekoliko ključnih komponenti: spremnik za akumulaciju topline, turbinu, ventilator, električni grijač i generator pare na povratnu toplinu. Ventilator ima ulogu u osiguravanju cirkulacije zraka atmosferskog tlaka unutar sustava, električni grijač osigurava potrebnu toplinsku energiju koja se prenosi na vulkanske stijene putem zraka, generator pare na povratnu toplinu omogućava konverziju pohranjene toplinske energije u korisnu paru, koja se pogoni na turbini i proizvodi električnu energiju.

Spremnik je izveden u obliku cilindra promjera  $D = 9$  m i dužine  $L = 14$  m, s volumenom od otprilike  $900 \text{ m}^3$ . Materijal koji se koristi za skladištenje toplinske energije su vulkanske stijene. U radu autora [9], provedena je detaljna eksperimentalna evaluacija svojstava i dimenzija vulkanskih stijena. Od svojstava, istraživani su specifični toplinski kapacitet, toplinska provodnost i gustoća stijena. Odabrane vrijednosti nalaze u tablici niže.

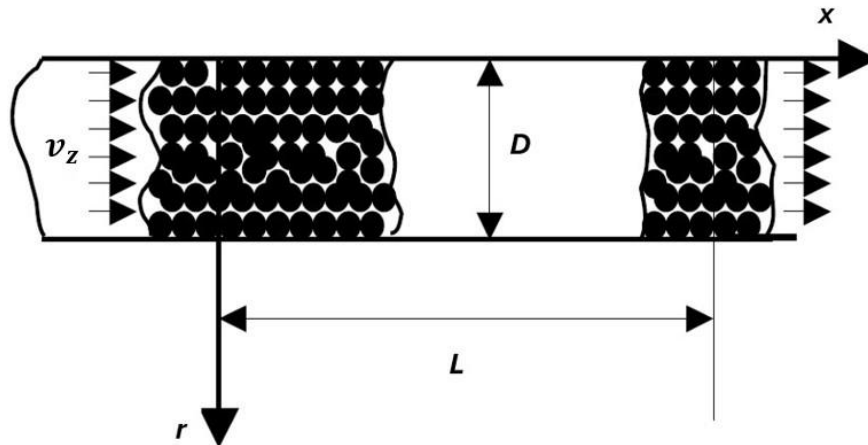
**Tablica 6 Dimenzije i svojstva vulkanskih stijena**

|  |      |
|--|------|
| Idealizirani promjer stijene $d_s$ , m                 | 0,02 |
| Specifični toplinski kapacitet $c_{p,s}$ , J/kgK       | 1050 |
| Toplinska provodnost $\lambda_s$ , W/mK                | 1,35 |
| Prosječna gustoća stijena $\rho_s$ , kg/m <sup>3</sup> | 2700 |



#### 4.1. Matematički model spremnika za akumulaciju topline

Prvi korak u termodinamičkom proračunu je određivanje masenog protoka zraka  $q_{m,z}$  koji je potreban kako bi dao/preuzeo toplinu radnom materijalu, te mase stijena unutar spremnika. Masa radnog materijala izravno je proporcionalno povezana s kapacitetom spremnika; povećanjem mase radnog medija, povećava se i toplinski kapacitet spremnika.



Slika 21 Shema strujanja zraka kroz spremnik za akumulaciju topline

Pretpostavljena proračunska snaga grijača  $P$  iznosi 10 MW, dok toplinski kapacitet spremnika  $Q_s$  iznosi 100 MWh<sub>t</sub>. Kasniji rezultati pokazuju da su pretpostavke bile u skladu sa stvarnim stanjem. Proces izmjene topline odvija se pri atmosferskom tlaku zraka od 1 bara. Kako bismo definirali poprečni presjek kroz koji zrak može strujati, potrebno je uvesti faktor poroznosti  $\varepsilon$ . Faktor poroznosti se definira kao omjer volumena praznina kroz koji fluid može strujati i ukupnog volumena spremnika. Članak [20] analizira razne kombinacije poroznih materijala i fluida, te za kombinaciju zraka i stijena predlaže vrijednost faktora poroznosti  $\varepsilon = 0,3$ . Kako bi se faktor poroznosti mogao primijeniti na poprečni presjek spremnika, potrebno je zadovoljiti dva uvjeta; materijal unutar spremnika mora biti homogeno raspoređen, bez značajnih varijacija u gustoći ili strukturi te volumen praznina kroz koje struji zrak treba biti konzistentan kroz cijeli spremnik. Poprečni presjek  $A_f$  kroz koji fluid može strujati računa se kao:

$$A_f = \varepsilon \cdot A = \varepsilon \cdot \frac{D^2 \pi}{4} = 0,3 \cdot \frac{9^2 \pi}{4} = 19,1 \text{ m}^2 \quad (1)$$

Masa stijena iznosi:

$$m_s = \frac{Q_s}{c_{p,s} \cdot (\vartheta_{s,max} - \vartheta_{s,min})} = 857142,9 \text{ kg} \quad (2)$$

#### 4.1.1. Proces punjenja

Proces punjenja može se pratiti plavom punom linijom na Slika 2 koja ulazi u spremnik te se u njemu vrši izmjena topline sa zagrijanog zraka na stijene. Zagrijavanje zraka vrši se putem Jouleovog efekta. Pretpostavka koja se koristi tijekom procesa punjenja je da su stijene i zrak u spremniku za akumulaciju topline već prethodno zagrijani na donju radnu temperaturu. U stvarnosti, potrebno je nekoliko ciklusa prolaska zagrijanog zraka kroz spremnik kako bi se postigla progrijanost. Tek nakon tih inicijalnih ciklusa, spremnik može učinkovito funkcionirati prema predviđenim specifikacijama. U procesu punjenja, zrak ulazi u spremnik temperaturom od 650 °C. U članku [9] je pronađena optimalni temperaturni režim punjenja za ETES sustave i iznosi 650 – 750 °C. Iznad tih temperatura, potrebno je koristiti cijevi od visokotemperaturnog čelika, što povećava investicijski trošak postrojenja.

Niža temperatura materijala za pohranu uglavnom je određena temperaturom izlaza iz generatora pare na otpadnu toplinu. Ona se kreće u rasponu 150 – 300 °C [9]. Za stacionarni proračun odabrana je temperatura zraka od 150 °C.

Kako bismo modelirali proces proces punjenja, prvo je potrebno izračunati koeficijent prijelaza topline  $\alpha_{charge}$  preko Nusseltovog broja u nasipnom sloju, a zatim i koeficijent prolaza topline  $k_{charge}$ . Fizikalna svojstva očitana su pomoću termodinamičkih tablica *CoolProp* za srednju temperaturu prolaska zraka kroz proces punjenja.

Prvo se računa maseni protok zraka:

$$q_{m,z} = \frac{P}{c_{p,z} \cdot (\vartheta_{z,max} - \vartheta_{z,min})} = 18,72 \text{ kg/s} \quad (3)$$

Zatim brzina strujanja zraka kroz stijene:

$$v_z = \frac{q_{m,z}}{\rho_z \cdot A_f} = 1,89 \text{ m/s} \quad (4)$$

Reynoldsov broj je bezdimenzijski broj koji opisuje omjer inercijskih i viskozni sila u fluidu te iznosi:

$$Re = \frac{d_s \cdot v_z}{\nu_z} = 589 \quad (5)$$

Drugi bezdimenzijski broj koji je potrebno izračunati je Prandtlov broj. On opisuje relativnu debljinu hidrodinamičkog sloja u odnosu na toplinski granični sloj, a definira se kao:

$$Pr = \frac{\rho_z \cdot v_z \cdot c_{p,z}}{\lambda_z} = 0,708 \quad (6)$$

Koeficijent prijelaza topline u prisilnoj konvekciji izračunava se pomoću Nusseltove korelacije za prijelaz topline u nasipnom sloju prema Gnielinskom [21]:

$$Nu_{turb} = \frac{0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr}{1 + 2,443 \cdot Re^{-0,1} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} = 5,87 \quad (7)$$

$$Nu_{lam} = 0,664 \cdot \sqrt{Re} \cdot \sqrt[3]{Pr} = 14,37 \quad (8)$$

Sada se može izračunati Nusseltov broj za prisilnu konvekciju  $Nu_{fo}$ :

$$Nu_{fo} = f_a \cdot \left( 2 + \sqrt{Nu_{lam}^2 + Nu_{turb}^2} \right) = 35,91 \quad (9)$$

Faktor oblika  $f_a$  u jednadžbi (9) je svojstvo nasipnog sloja i definira se kao:

$$f_a = 1 + 1,5 \cdot (1 - \varepsilon) = 2,05 \quad (10)$$

S obzirom da je brzina strujanja fluida unutar nasipnog sloja mala, potrebno je provjeriti mogućnost pojave slobodne konvekcije. Richardsonov broj  $Ri$  se koristi kako bi se procijenila dominantnost prisilne ili slobodne konvekcije. No, najprije se mora izračunati Grashofov broj  $Gr$  koji je također bezdimenzijski i predstavlja omjer uzgonskih i viskoznih sila koje djeluju na fluid pri akceleraciji sile teže  $g$  i koeficijentu toplinskog širenja  $\beta$ :

$$Gr = \frac{d_s^3 \cdot g \cdot \beta}{\nu_z^2} \cdot |\vartheta_s - \vartheta_z| = 17064 \quad (11)$$

$\vartheta_s$  i  $\vartheta_z$  predstavljaju prosječne temperature stijene, tj. zraka tijekom procesa punjenja. Richardsonov broj  $Ri$  iznosi:

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} = 0,049 \quad (12)$$

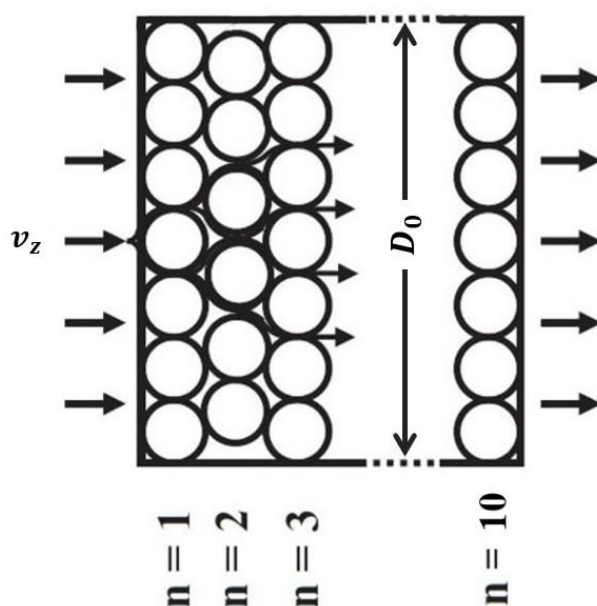
Uzima se pravilo da ako je  $Ri > 10$ , protok je dominantno vođen prirodnom konvekcijom, a ako je  $Ri < 0,1$  protok je vođen prisilnom konvekcijom [22]. Ako se pojave uvjeti strujanja da je  $0,1 \leq Ri \leq 10$ , potrebno je uzeti u obzir obje vrste konvekcije [22]. Na temelju ovih uvjeta, može se zaključiti da je u matematički model potrebno implementirati prisilnu konvekciju. Koeficijent prijelaza topline  $\alpha_{charge}$  tijekom punjenja iznosi:

$$\alpha_{charge} = \frac{Nu_{fo} \cdot \lambda_z}{d_s} = 90,2 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (13)$$

Nakon izračuna koeficijenta prijelaza topline  $\alpha_{charge}$ , može se izračunati sveukupni prolaz topline koji uključuje i kondukciju topline od površine stijene prema unutrašnjosti i obrnuto kao:

$$k_{charge} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{charge}} + \frac{d_s}{2 \cdot \lambda_s}} = 57,1 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (14)$$

Sljedeći korak je postaviti jednadžbe očuvanja energije za stijenu i za zrak. Koristio se model s distribuiranim parametrima koji ima funkciju detaljno modeliranja složenih sustava, gdje se sustav dijeli na više manjih dijelova kako bi se preciznije opisala dinamika sustava. U ovom slučaju, spremnik je podijeljen, uzdužno s osi  $x$ , na 10 jednakih dijelova. Poprečni presjek je također podijeljen na 100 dijelova. Time je dobiven skup tzv. referentnih cijevi, za koje je model jedne cijevi izrađen u *Simulinku*. Pojednostavljeni prikaz diskretizacije prikazan je na sljedećoj slici.



Slika 22 Pojednostavljena shema diskretizacije referentne cijevi

Volumen diskretiziranog dijela spremnika računa se prema:

$$V_0 = \frac{m_s}{1000 \cdot \rho_s \cdot (1 - \varepsilon)} = 0,3628 \text{ m}^3 \quad (15)$$

Promjer referentne cijevi  $D_0$  može se izračunati iz:

$$D_0 = \sqrt{\frac{40 \cdot V_0}{\pi \cdot L}} = 0,57 \text{ m} \quad (16)$$

Broj stijena  $n_s$  koji se nalazi u diskretiziranom dijelu spremnika iznosi:

$$n_s = \frac{V_0 \cdot (1 - \varepsilon)}{\frac{d_s^3 \pi}{6}} = 60630 \quad (17)$$

Izmijenjena toplina  $\phi_n$  modelira se Newtonovim zakonom prolaza topline. Zapisuje se kao:

$$\phi_n = k_{charge} \cdot A_p \cdot (T_{s,n} - T_{z,n}) \quad (18)$$

za  $n = 1, 2, 3, \dots, 10$ .

S obzirom na to da maseni protok ne ulazi u referentnu cijev u svom punom iznosu, potrebno je izračunati odgovarajući udio protoka. To se može preko faktora  $\omega_A$ :

$$\omega_A = \frac{D^2}{D_0^2} \quad (19)$$

Promjena energije koja je sadržana u sustavu jednaka je razlici ulaznih i izlaznih energetske tokova:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{e}_{ulaz} - \dot{e}_{izlaz} \quad (20)$$

Pretpostavka koja se uvodi u model je, da je sva energija zraka sadržana u obliku unutarnje energije, dok se svi ostali oblici energije zanemaruju. Zakon očuvanja energije za zrak glasi: Promjena unutarnje energije zraka jednaka je razlici advektivnog toka ulaza i izlaza u segment i dobivenom toplinskom toku od materijala za pohranu.

$$\frac{d(M_z \cdot c_{p,z} \cdot T_{z,n})}{dt} = \frac{q_{m,z}}{\omega_A} \cdot c_{p,z} \cdot (T_{z,n-1} - T_{z,n}) + \phi_n \quad (21)$$

Krajnji oblik jednadžbe (21) glasi:

$$\frac{d(T_{z,n})}{dt} = \frac{1}{\rho_z \cdot V_0 \cdot \varepsilon \cdot c_{p,z}} \cdot \left( \frac{q_{m,z}}{\omega_A} \cdot c_{p,z} \cdot (T_{z,n-1} - T_{z,n}) + k_{charge} \cdot A_p \cdot (T_{s,n} - T_{z,n}) \right) \quad (22)$$

za  $n = 1, 2, 3, \dots, 10$ .

$A_p$  je površina prijelaza topline sa stijena na zrak te dobije umnoškom broja stijena u segmentu i oplošja jedne stijene:

$$A_p = n_s \cdot d_s^2 \pi = 76,19 \text{ m}^2 \quad (23)$$

Ista pretpostavka o sadržanoj energiji sustava koja vrijedi kod zraka, vrijedi i kod vulkanskih stijena. Promjena toka energije na strani stijena sadrži samo izmijenjeni toplinski tok sa zrakom pa se može pisati:

$$\frac{d(M_s \cdot c_s \cdot T_{s,n})}{dt} = -\phi_n \quad (24)$$

Krajnji oblik jednadžbe (24) glasi:

$$\frac{d(T_{s,n})}{dt} = -\frac{1}{\rho_s \cdot V_0 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot c_s} \cdot k_{charge} \cdot A_p \cdot (T_{s,n} - T_{z,n}) \quad (25)$$

za  $n = 1, 2, 3, \dots, 10$ .

#### 4.1.2. Proces pražnjenja

Proces pražnjenja može se pratiti plavom isprekidanom linijom na Slika 2 koja ulazi u spremnik te se u njemu vrši izmjena topline sa stijena na zrak. Pretpostavljeno je da su srednje temperature zraka i stijene tijekom procesa pražnjenja slične onima u procesu punjenja, stoga vrijednosti svojstava zraka i stijene, bezdimenzijski brojevi, koeficijent prolaza topline ostaje nepromijenjeni, te vrijedi  $k_{charge} = k_{discharge}$ . Također, s obzirom na to da se radi o zatvorenom zračnom sustavu, prema jednadžbi kontinuiteta, maseni protok zraka ostaje isti prema svom iznosu, ali ima suprotan smjer strujanja. Jednadžbe koje opisuju zakon očuvanje energije ostaju identične procesu pražnjenja, s tim da se više ne uzima  $n - 1$  segment, već  $n + 1$ , pa tako jednadžba za zrak glasi:

$$\frac{d(T_{z,n})}{dt} = \frac{1}{\rho_z \cdot V_0 \cdot \varepsilon \cdot c_{p,z}} \cdot \left( \frac{q_{m,z}}{\omega_A} \cdot c_{p,z} \cdot (T_{z,n+1} - T_{z,n}) + k_{discharge} \cdot A_p \cdot (T_{s,n} - T_{z,n}) \right) \quad (26)$$

za  $n = 1, 2, 3, \dots, 10$ .

Jednadžbe za stijenu glase:

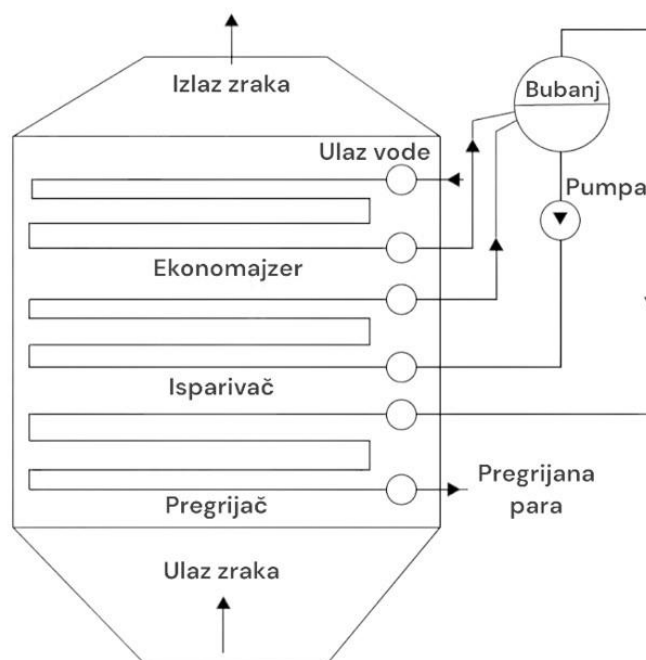
$$\frac{d(T_{s,n})}{dt} = -\frac{1}{\rho_s \cdot V_0 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot c_s} \cdot k_{discharge} \cdot A_p \cdot (T_{s,n} - T_{z,n}) \quad (27)$$

za  $n = 1, 2, 3, \dots, 10$ .

## 4.2. Proračun generatora pare na otpadnu toplinu

Generator pare na otpadnu toplinu (eng. *Heat recovery steam generator – HRSG*) je jedna od komponenata sustava proizvodnje električne energije koja je dizajnirana prvenstveno za oporavak topline iz ispušnih plinova, te koristeći tu toplinu za proizvodnju pare koja se zatim koristi za pokretanje parne turbine. U ovom rad ispušne plinove zamjenjuje vući zrak koji se

zagrijava u spremniku za akumulaciju topline. HRSG se sastoji od nekoliko komponenta kako bi se toplina što učinkovitije prenijela na radni fluid, tj. vodu/paru.



Slika 23 Shematski prikaz generatora pare na povratnu toplinu [23]

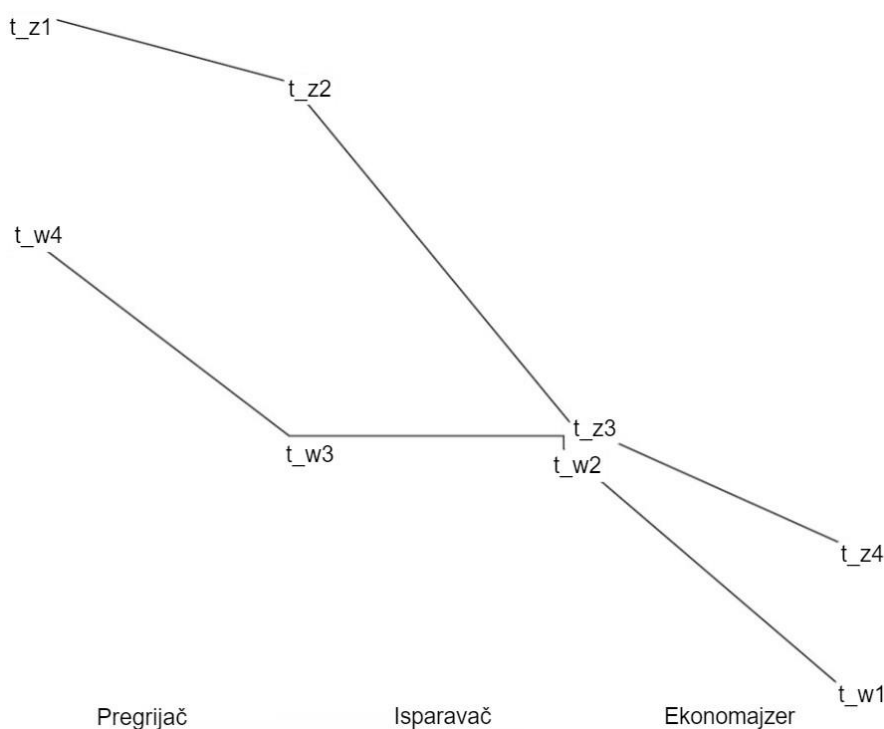
Ekonomajzer zagrijava vodu koja ulazi u isparivač te na taj način povećava učinkovitost sustava. Isparivač je dio izmjenjivača u kojem se vrela kapljevinna pretvara u suhozasićenu paru. Pregrijač zagrijava suhozasićenu paru iznad točke zasićenja na veći toplinski potencijal. Pregrijana para ima veću entalpiju, što povećava učinkovitost turbine.

Prilikom projektiranja HRSG-a, važno je obratiti pažnju na *pinch* i *approach* točku, osobito kad su ulazne temperature zraka relativno niske, između 400 – 600 °C [23]. *Pinch* točka se definira kao razlika između temperature zraka koji napušta isparivač i temperature zasićenja. Dok s druge strane, *approach* točka je razlika između temperature zasićenja i vode koja napušta ekonomajzer.

U slučajevima konvencionalnih generatora pare gdje je temperatura izgaranja vrlo visoka, npr. 1800 – 1900 °C, *pinch* i *approach* točke ne igraju značajnu ulogu te se ispušni plinovi ili zrak mogu ohladiti do vrlo niskih temperatura [23]. Ovo hlađenje se postiže prolaskom plinova kroz ekonomajzer, koji može biti vrlo velik i prilagođen za prijenos velike količine topline. Nasuprot tome, zbog nižih ulaznih temperatura i ograničenja postavljenih *pinch* točkom i tlakom pare, izlazna temperatura zraka iz ekonomajzera ne može se unaprijed predvidjeti bez detaljne analize temperaturnog profila. Kada je potrebno maksimizirati proizvodnju pare, inženjeri često biraju niske *pinch* i *approach* točke (5 – 7 °C) [23].

Prilikom stacionarnog proračuna generatora pare, polazimo od izlazne temperature zraka iz spremnika za akumulaciju topline, koja je dobivena simulacijom. Ona iznosi  $\vartheta_{z1} = 650 \text{ °C}$  te stvara pregrijanu paru temperature  $\vartheta_{w4} = 400 \text{ °C}$  i tlaka  $p_w = 20 \text{ bar}$ . *Pinch*  $\Delta_{pinch}$  i *approach*  $\Delta_{approach}$  točke odabrane su prema preporukama iz izvora [23] i iznose  $\Delta_{pinch} = 30 \text{ °C}$ ,  $\Delta_{approach} = 20 \text{ °C}$ . Temperatura zasićenja vode/pare je iščitana pomoću biblioteke *XSteam* (kao i sve ostala svojstva prilikom proračuna) i iznosi  $\vartheta_{ws} = 212,4 \text{ °C}$ . Gubitak topline  $\zeta_q$  na prijelazu iz ekonomjzera u isparivač je također određen prema [23] i iznosi  $\zeta_q = 1\%$ . Specifična entalpija pregriijane pare  $h_{w4}$  na izlazu pregrijača, specifična entalpija vrele kapljevine  $h_{wL}$  na ulazu u isparivač i specifična entalpija  $h_{wV}$  na izlazu iz isparivača određene su za dani tlak i temperaturu.

Radi lakše vizualizacije procesa u generatoru pare, dan je općeniti dijagram na sljedećoj slici. Ulazi vode i zraka u sustav označeni su indeksom 1.



**Slika 24 Općeniti temperaturni profil procesa u generatoru pare na povratnu toplinu**

Temperatura zraka na izlazu iz isparivača:

$$\vartheta_{z3} = \vartheta_{ws} + \Delta_{pinch} = 242,4 \text{ °C} \quad (28)$$

Srednja temperatura zraka u pregrijaču i isparivaču:

$$\vartheta_{z13} = \frac{\vartheta_{z1} + \vartheta_{z3}}{2} = 446,2 \text{ °C} \quad (29)$$



Sada je moguće odrediti specifični toplinski kapacitet  $c_{p,z13}$  zraka u isparivaču i pregrijaču.

Toplina koja se predaje pari u isparivačkom i pregrijačkom dijelu iznosi:

$$\phi_{isp\_preg} = q_{m,z} \cdot c_{p,z13} \cdot (\vartheta_{z1} - \vartheta_{z3}) \cdot (1 - \zeta_q) = 8154,7 \text{ kW} \quad (30)$$

Temperatura pothlađene kapljevine koja izlazi iz ekonomajzera i ulazi u bubanj iznosi:

$$\vartheta_{w2} = \vartheta_{ws} - \Delta_{approach} = 192,4 \text{ °C} \quad (31)$$

Sada je moguće očitati entalpiju  $h_{w2}$  za navedeno stanje.

Potreban maseni protok vode/pare računa se:

$$q_{m,w} = \frac{\phi_{isp\_preg}}{h_{w4} - h_{w2} + \zeta_q \cdot (h_{wL} - h_{w2})} = 3,36 \text{ kg/s} \quad (32)$$

Izmijenjeni toplinski tok u pregrijaču iznosi:

$$\phi_{preg} = q_{m,w} \cdot (h_{w4} - h_{wV}) = 1509,2 \text{ kW} \quad (33)$$

Kako bi se izračunala izlazna temperatura zraka  $\vartheta_{z2}$  iz pregrijača, potrebno je provesti iterativan postupak. Naime, specifični toplinski kapacitet  $c_{p,z12}$  zraka pregrijača ovisi o temperaturi  $\vartheta_{z2}$  koja je nepoznata. Prvo se pretpostavi temperatura  $\vartheta'_{z2}$ , zatim se iščita specifični toplinski kapacitet  $c_{p,z12}$  te se izračuna nova temperatura  $\vartheta_{z2}$  koja postaje ulazni parametar za određivanje  $c_{p,z12}$ . Nakon provedenog iterativnog proračuna, temperatura  $\vartheta_{z2}$  iznosi:

$$\vartheta_{z2} = \vartheta_{z1} - \frac{\phi_{preg}}{q_{m,z} \cdot c_{p,z12}} = 577,9 \text{ °C} \quad (34)$$

Toplinski tok isparivača računa se:

$$\phi_{isp} = \phi_{isp\_preg} - \phi_{preg} = 6645,5 \text{ kW} \quad (35)$$

Voda ulazi u ekonomajzer sa temperaturom  $\vartheta_{w1} = 15 \text{ °C}$  (objašnjeno u sljedećem poglavlju) i entalpijom  $h_{w1}$ .

Toplinski tok izmijenjen u ekonomajzeru iznosi:

$$\phi_{eko} = q_{m,w} \cdot (h_{w2} - h_{w1}) = 2528,4 \text{ kW} \quad (36)$$

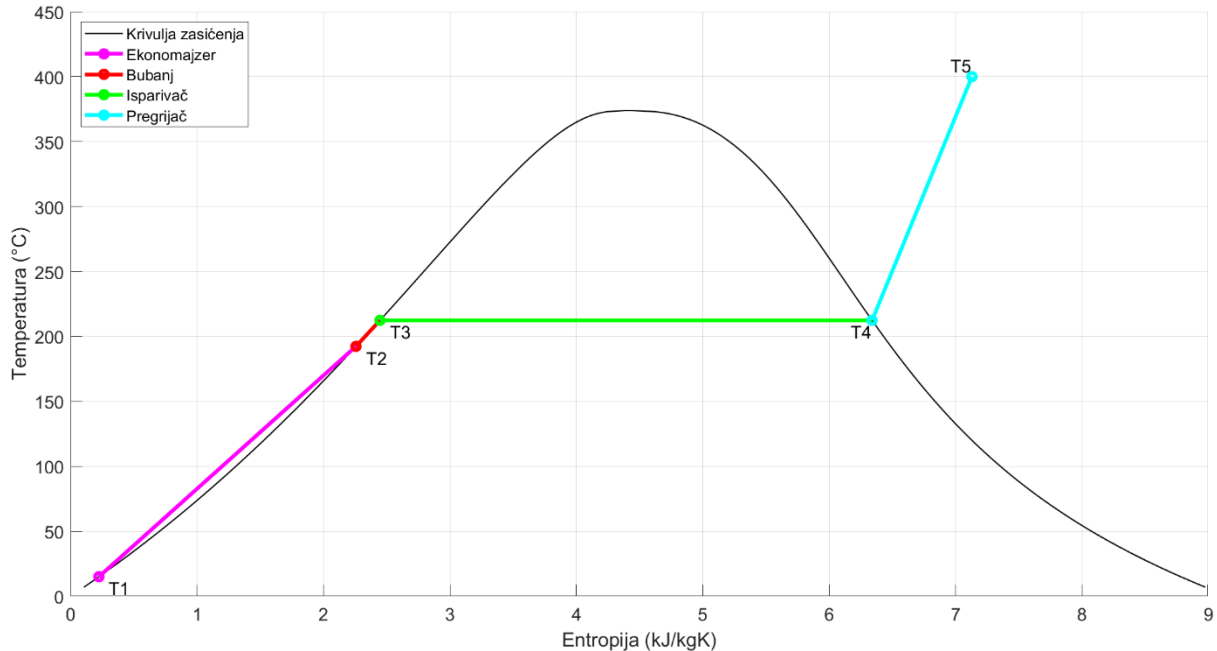
Temperatura zraka  $\vartheta_{z4}$  na izlazu iz ekonomajzera također se određuje na isti način iterativno kao i temperatura  $\vartheta_{z2}$ . Nakon iteracije, iznosi:

$$\vartheta_{z4} = \vartheta_{z3} - \frac{\phi_{eko}}{q_{m,z} \cdot c_{p,z34}} = 110,1 \text{ °C} \quad (37)$$

Ukupan toplinski tok izmijenjen u generatoru pare iznosi  $\phi_{uk} = 10,68 \text{ MW}$ .

Sljedeća tablica prikazuje iznose entalpije očitane pomoću biblioteka *CoolProp* i temperatura u karakterističnim točkama generatora pare.

Prikaz cijelog procesa može se pratiti u T-s dijagramu, što prikazuje sljedeća slika.

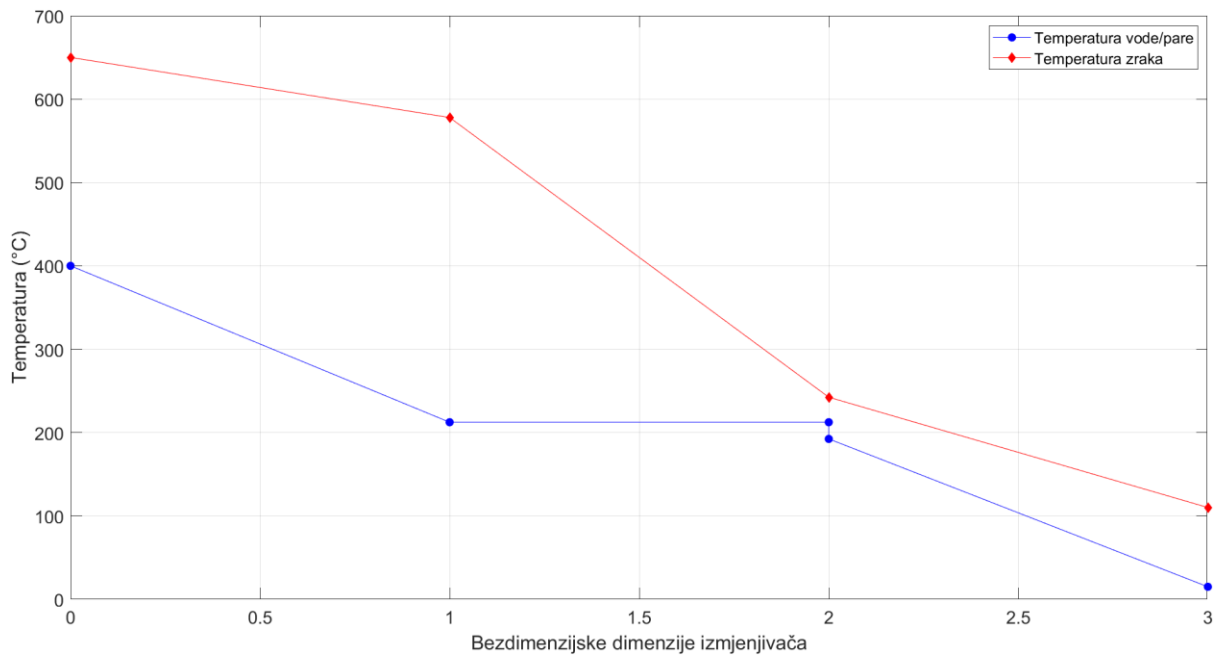


Slika 25 T-s dijagram procesa zagrijavanja i isparavanja vode/pare u generatoru pare

Tablica 7 Entalpije u karakterističnim dijelovima generatora pare

| Mjesto                    | Entalpija                                 |
|---------------------------|---|
| Ulaz u ekonomajzer, T1    | $h_{w1} = 64,9 \text{ kJ/kgK}$            |
| Izlaz iz ekonomajzera, T2 | $h_{w2} = 818,5 \text{ kJ/kgK}$           |
| Ulaz u isparivač, T3      | $h_{wL} = 908,6 \text{ kJ/kgK}$           |
| Izlaz iz isparivača, T4   | $h_{wV} = 2798,4 \text{ kJ/kgK}$          |
| Ulaz u pregrijač, T4      | $h_{w3} = h_{wV} = 2798,4 \text{ kJ/kgK}$ |
| Izlaz iz pregrijača, T5   | $h_{w4} = 3248,2 \text{ kJ/kgK}$          |

Također je korisno prikazati temperaturnu raspodjelu zraka i vode/pare u bezdimenzijskom obliku, jer se u tom formatu najjasnije uočavaju *pinch* i *approach* točke.



Slika 26 Raspodjela temperature u generatoru pare

#### 4.3. Proračun snage turbine i efikasnosti Rankineovog procesa

Kako bismo proizveli mehanički rad iz potencijala toplinske energije pregrijane pare, a potom i električnu energiju, potrebno je implementirati parnu turbinu koristeći Rankineov proces. Određivanje temperature kondenzacije u Rankine ciklusu predstavlja izazov zbog njenog utjecaja na učinkovitost procesa, ekonomske troškove i ekološke aspekte. Niža temperatura kondenzacije omogućuje veću ekspanziju pare u turbini, što rezultira povećanjem entalpijskog pada i, posljedično, većim mehaničkim radom.

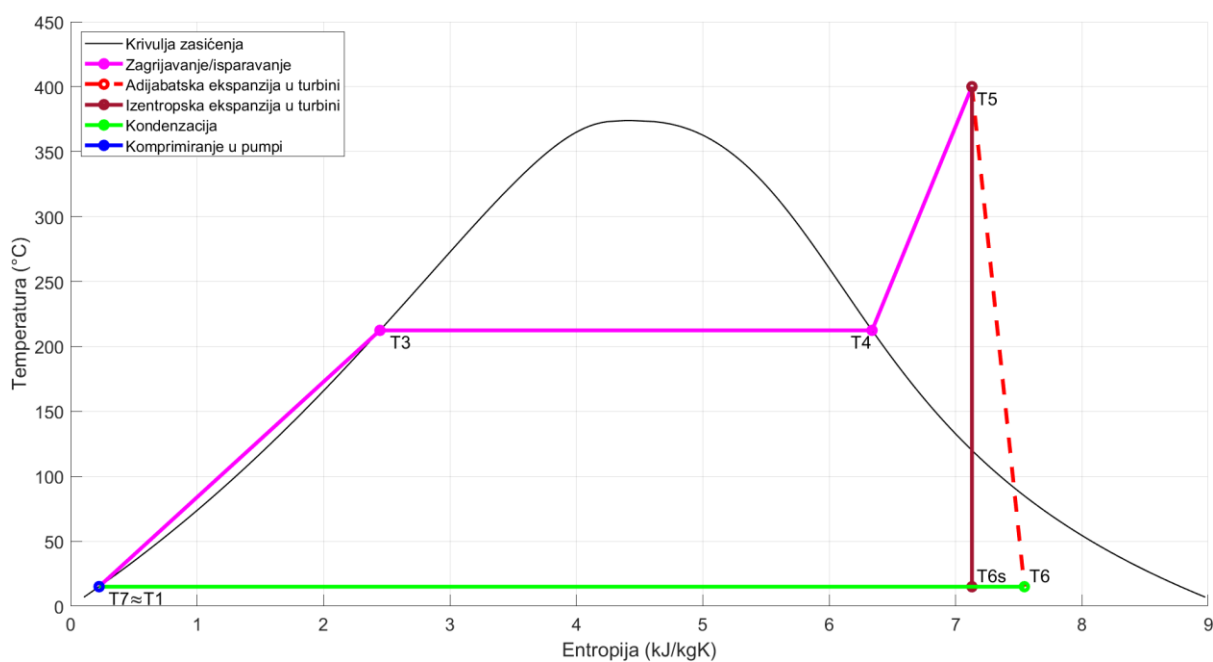
Za hlađenje mokre pare nakon ekspanzije, odabran je vodom hlađeni kondenzator. Temperatura rashladne vode je pretpostavljena kao konstantna 12 °C. Prema temperaturi rashladne vode, određena je temperatura kondenzacije Rankineovog procesa i iznosi  $\vartheta_{cond} = 15$  °C. Parametri pregrijane pare određeni su u prošlom poglavlju:

Tablica 8 Parametri pregrijane pare

| Parametri pregrijane pare         | Vrijednost |
|-----------------------------------|------------|
| Temperatura $\vartheta_{w4}$ , °C | 400        |
| Entalpija $h_{w4}$ , kJ/kg        | 3248,2     |
| Entropija $s_{w4}$ , kJ/kgK       | 7,13       |

Prvotno je potrebno izračunati parametre pare nakon izentropske ekspanzije, a zatim parametre nakon adijabatske (realne) ekspanzije. Izentropska ekspanzija predstavlja idealnu ekspanziju pare u turbini, gdje nema prijenosa topline niti trenja. Ovaj proces je povratan, što znači da teoretski može vratiti sustav u njegovo početno stanje bez ikakvih gubitaka energije. U stvarnim uvjetima, ovakav idealan proces je teško postići, ali služi kao referentna točka za procjenu performansi stvarnih sustava.

S druge strane, adijabatska ekspanzija, iako također ne uključuje prijenos topline, uzima u obzir neizbježne gubitke energije uzrokovane trenjem i drugim ireverzibilnostima unutar turbine. Adijabatski proces nije povratan, što znači da se gubici energije ne mogu povratiti. Gubici energije u adijabatskom procesu uzrokovani su trenjem, turbulencijama i ostalim ireverzibilnim efektima, što rezultira nižom učinkovitošću u usporedbi s izentropskom ekspanzijom.



Slika 27 T-s dijagram Rankineovog procesa

Prilikom izentropske ekspanzije, entropija prije i nakon ekspanzije su jednake:

$$s_{w4} = s_{w5,s} = 7,13 \text{ kJ/kgK} \quad (38)$$

Entalpija  $h_{6s}$  se sada može očitati pomoću termodinamičkih tablica i iznosi  $h_{w5,s} = 2052,5 \text{ kJ/kg}$ .

Izentropska iskoristivost turbine  $\eta_t$  pretpostavljena je  $\eta_t = 0,9$ .

Sada se može izračunati stvarna entalpija nakon adijabatske ekspanzije:

$$h_{w5} = h_{w4} - \eta_t \cdot (h_{w4} - h_{w5,s}) = 2172,1 \text{ kJ/kg} \quad (39)$$

Snaga turbine iznosi:

$$P_t = q_{m,w} \cdot (h_{w4} - h_{w5}) = 3,61 \text{ MW} \quad (40)$$

Snaga pumpe u proračunu se može zanemariti, što je vidljivo sa Slika 27, zbog njenog malog iznosa u usporedbi sa snagom turbine. Iako je njihov rad neophodan za podizanje tlaka tekućine i omogućavanje ponovnog ulaska u generator pare, energija potrebna za rad pumpi je relativno mala u odnosu na energiju koju proizvodi turbina.

Iskoristivost cijelog Rankine ciklusa računa se kao omjer dobivenog rada i dovedene topline u generatoru pare izračunate u prethodnom poglavlju, te u projektnom režimu rada iznosi:

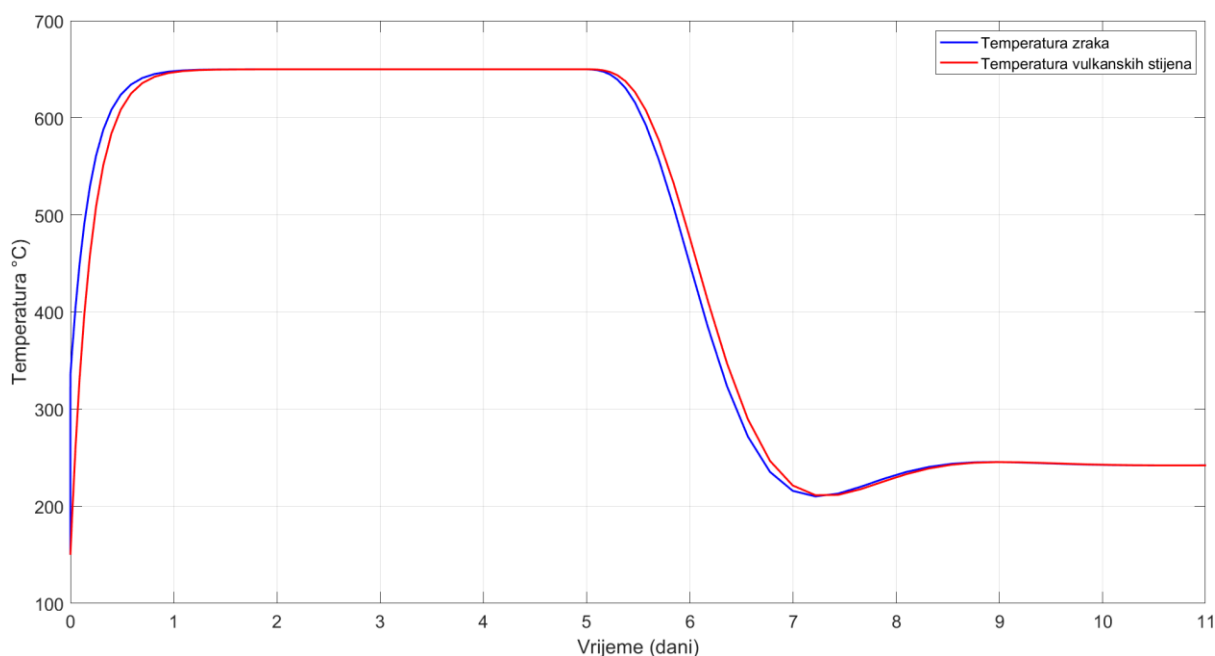
$$\eta = \frac{P_t}{\phi_{uk}} = 0,3381 = 33,81 \% \quad (41)$$

## 5. REZULTATI SIMULACIJE RADA VE I CARNOTOVE BATERIJE

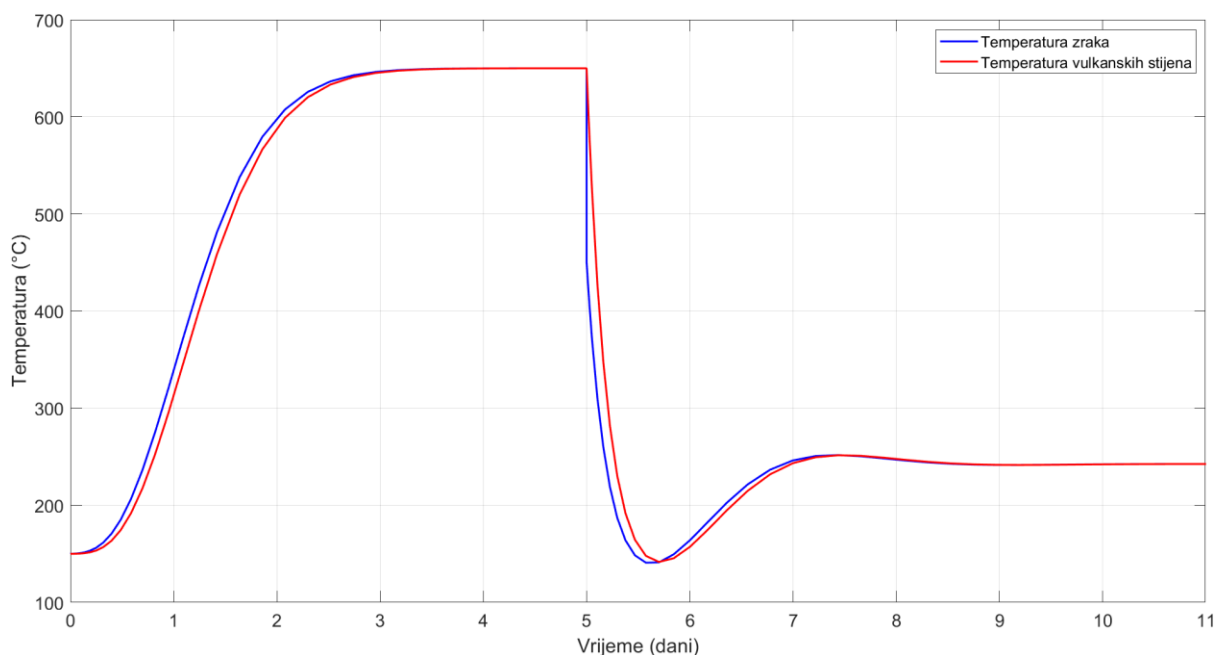
U ovom poglavlju prikazani su rezultati simulacije ponašanja Carnotove baterije u dva različita scenarija: osnovnom načinu rada bez integracije s vjetroelektranom te načinu rada s integriranom proizvodnjom električne energije iz vjetroelektrane Bili Brig.

### 5.1. Validacija modela (bez integrirane VE Bili Brig)

U prvom slučaju napravljena je simulacija dinamike ponašanja sustava Carnotove baterije neovisno o proizvodnom profilu (Slika 31) i cijeni električne energije (Slika 32). Na taj način se olakšava početna analiza i identifikacija osnovnih karakteristika rada sustava, pružajući temelj za daljnju optimizaciju i složeniju simulacije. Napravljena je simulacija uzastopnog punjenja i pražnjenja spremnika. Ovaj model obuhvaća sve komponente sustava definirane u prethodnom poglavlju: spremnik, generator pare na povratnu toplinu i model grijača. Simulacija spremnika za akumulaciju topline izvedena je za referentni modul koji je podijeljen na 10 uzdužnih dijelova, što je objašnjeno u prethodnom poglavlju. Inicijalizirana temperatura vulkanskih stijena i zraka postavljena je na 150 °C (pretpostavka početne progrijanosti sustava).



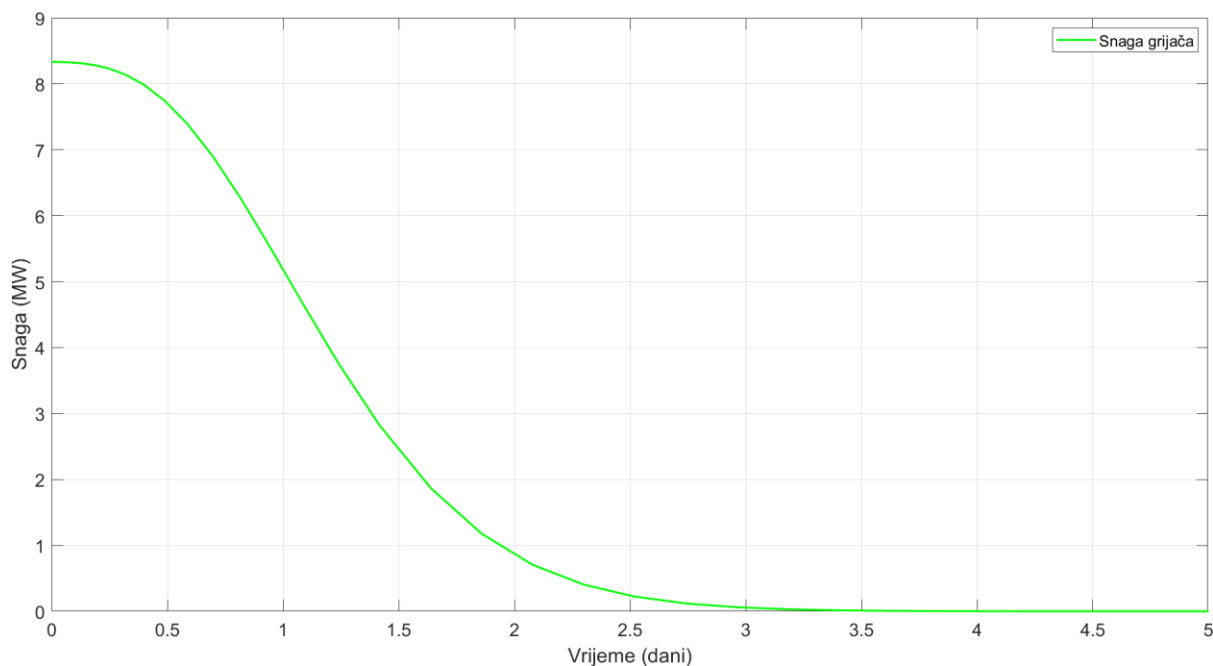
Slika 28 Temperaturni profili zraka i vulkanskih stijena u 1. segmentu spremnika



**Slika 29 Temperaturni profili zraka i vulkanskih stijena u 10. segmentu spremnika**

Slika 28 prikazuje temperaturne profile u ulaznom segmentu spremnika prilikom procesa punjenja, dok je to ujedno izlazni segment tokom pražnjenja. Nasuprot tome, Slika 29 prikazuje ulazni segment spremnika tokom pražnjenja, odnosno izlazni segment prilikom punjenja. Može se primijetiti kako se u ulaznom segmentu punjenja, zrak brže zagrijava u odnosu na zrak u izlaznom segmentu, što je posljedica dužine spremnika. Temperatura zraka u prvom segmentu brže postigne stacionarno stanje koje iznosi 650 °C. Vrijeme potrebno zraku za uspostavu temperature punjenja na izlazu iz spremnika iznosi 4 dana.

U *Simulink* modelu postavljen je blok Step koji nakon 5 dana automatski mijenja proces iz punjenja u pražnjenje. Prilikom procesa pražnjenja, dolazi do promjene smjera masenog protoka zraka. Zrak ulazi u model generatora pare, gdje koristi povratnu toplinu za stvaranje pregrijane pare. Nakon izlaska iz generatora pare, zrak se vraća na ulaz u model gdje opet prolazi kroz proces pražnjenja. Pregrijana para zatim ekspandira u turbini, generirajući električnu energiju. Stacionarna temperatura zraka koja se uspostavlja nakon izmjene topline u generatoru pare iznosi oko 240 °C. Vrijeme potrebno zraku za uspostavu stacionarne temperature nakon generatora pare iznosi 6 dana.



**Slika 30 Snaga grijača prilikom procesa punjenja**

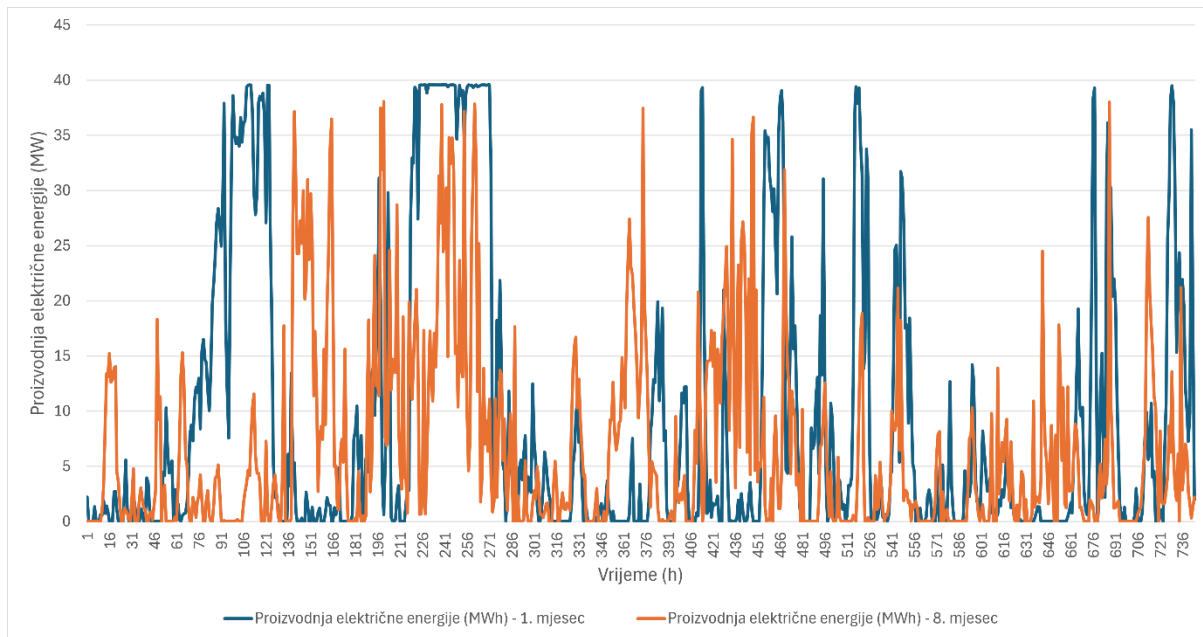
Prethodna slika prikazuje snagu grijača potrebnu kako bi se dostigla temperatura punjenja od 650 °C. Snaga se eksponencijalno smanjuje s vremenom kako se temperatura zraka povisuje. S obzirom na to da je maseni protok zraka konstantan, snaga se prilagođava temperaturnoj razlici prilikom ciklusa punjenja. Na početku ciklusa, kada je temperaturna razlika između zraka i ciljne temperature najveća, potrebna je maksimalna snaga grijača. Kako se temperatura povratnog zraka približava temperaturi punjenja od 650 °C, temperaturna razlika se smanjuje, što dovodi do smanjenja snage grijača.

## 5.2. Model s integriranom VE Bili Brig

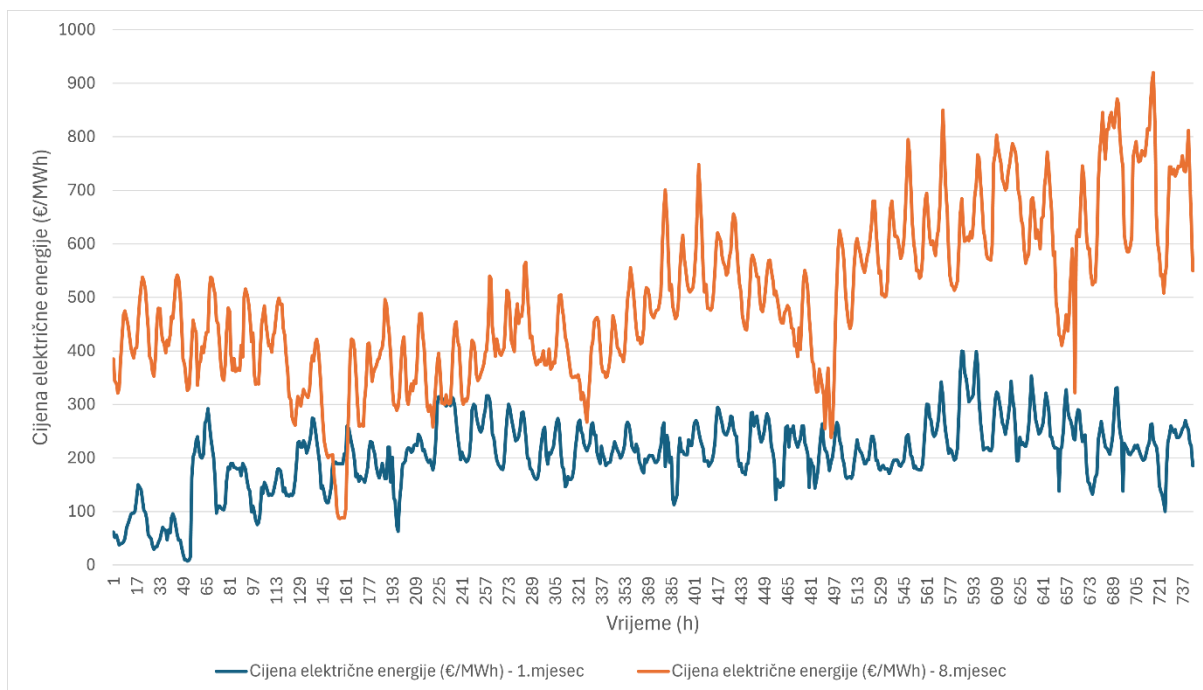
Za daljnje modeliranje uzimaju se satni podaci za proizvodnju jednog mjeseca u 2022. godini i primjenjuju kao rubni uvjet u modeliranje ponašanja Carnotove baterije.

Za modeliranje izabrani su 1. i 8. mjesec u 2022. godini. Na slici ispod nalaze se profili kretanja proizvodnje električne energije VE Bili Brig dobiveni simulacijom i cijene električne energije za isti period. Cijene električne energije su preuzete iz baze Europske mreže operatora prijenosnog sustava [24].





Slika 31 Proizvodnja VE Bili Brig za odabrani period



Slika 32 Cijena električne energije za odabrani period

S obzirom na značajne varijacije cijena električne energije između dva odabrana mjeseca, ključno je definirati pragove cijena pri kojima će sustav Carnotove baterije proizvoditi električnu energiju, te one pri kojima će je pohranjivati kako bi se ostvarila dobit. Osim punjenja i pražnjenja, toplinski spremnik također ima mogućnost mirovanja. Za model mirovanja vrijede jednadžbe (22) i (26) kao i kod modela punjenja i pražnjenja, s jedinom razlikom da je maseni protok zraka  $q_{m,z}$  jednak 0.

**Tablica 9** Pragovi cijena kupnje i prodaje električne energije Carnotove baterije

|           | 1. mjesec                                   | 8. mjesec                                   |
|-----------|---|---|
| Kupnja    | $x \leq 100 \text{ €/MWh}$                  | $x \leq 200 \text{ €/MWh}$                  |
| Mirovanje | $100 \text{ €/MWh} < x < 300 \text{ €/MWh}$ | $200 \text{ €/MWh} < x < 500 \text{ €/MWh}$ |
| Prodaja   | $x \geq 300 \text{ €/MWh}$                  | $x \geq 500 \text{ €/MWh}$                  |

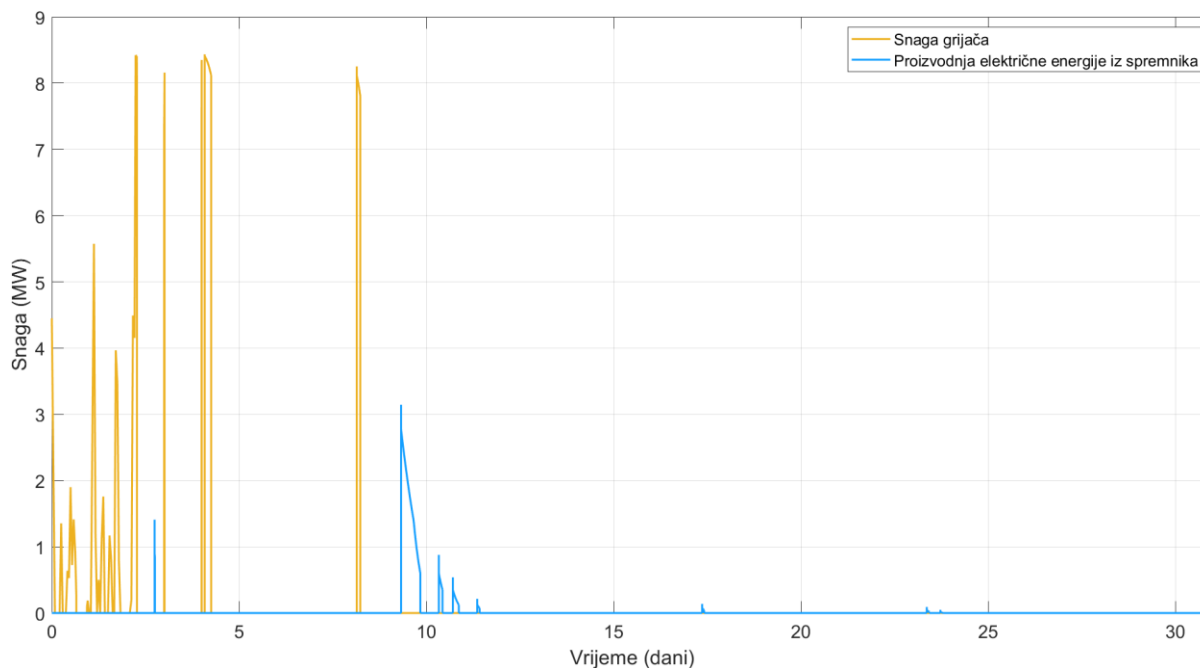
Nadalje, električna energija proizvedena u generatoru pare, koja se prodaje po cijeni od 300, odnosno 500 €/MWh, generira se korištenjem pregrijane pare proračunske temperature od 400 °C. Kako ta vrijednost u stvarnosti nije konstanta, potrebno je uvesti korekcijsku korelaciju za proizvodnju električne energije iz Rankineovog ciklusa.

$$P_{el} = \phi_{uk} \cdot \eta \cdot \min\left(1, \frac{\vartheta_{w4} - 200}{200}\right) \quad (42)$$

Kada temperatura pregrijane pare padne ispod temperature od 400 °C, iskoristivost Rankineovog ciklusa se smanjuje.

### 5.2.1. Period rada tijekom 1. mjeseca

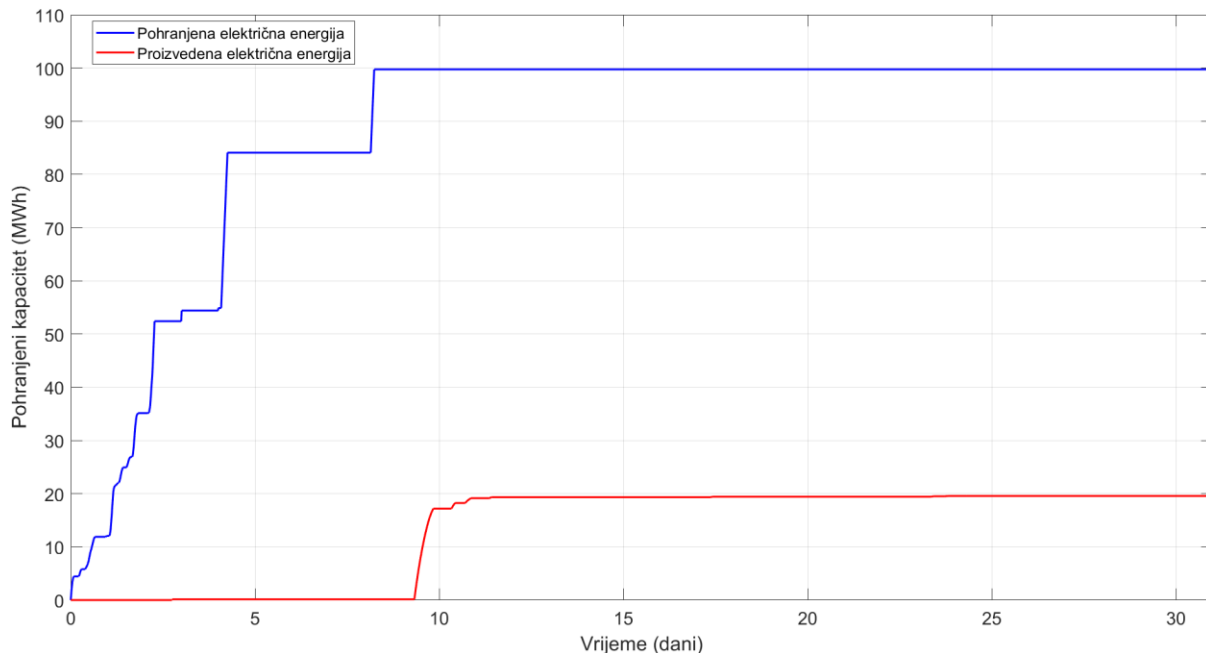
Analizirajući graf cijene električne energije u 1. mjesecu, vidljivo je da će najveći postotak vremena, Carnotova baterija raditi u režimu punjenja zbog kretanja cijena između graničnih vrijednosti cijena danih u Tablica 9.



**Slika 33** Snaga grijača i proizvodnja električne energije iz spremnika – 1. mjesec

Slika iznad prikazuje profil snage grijača za zagrijavanje zraka koji ulazi u spremnik za akumulaciju topline. Izgled profila je vrlo logičan s obzirom na to da je cijena električne energije bila manja od 100 €/MWh u najvećem dijelu početkom siječnja. Snaga grijača u nekoliko navrata dostiže najveću vrijednost od 7 MW, što ukazuje na periode intenzivnog korištenja grijača kada je cijena električne energije bila najpovoljnija i kada je VE proizvodila s dovoljnom snagom.

Primjetno je da se aktivnost grijača značajno smanjuje nakon prvih nekoliko dana, što je povezano s promjenama u cijenama električne energije ili limitiranim kapacitetom spremnika. Tokom prvih pet dana, snaga grijača pokazuje značajna fluktuiranja, s brzim porastima i padovima u snazi, dok nakon tog perioda, aktivnost postaje rjeđa.

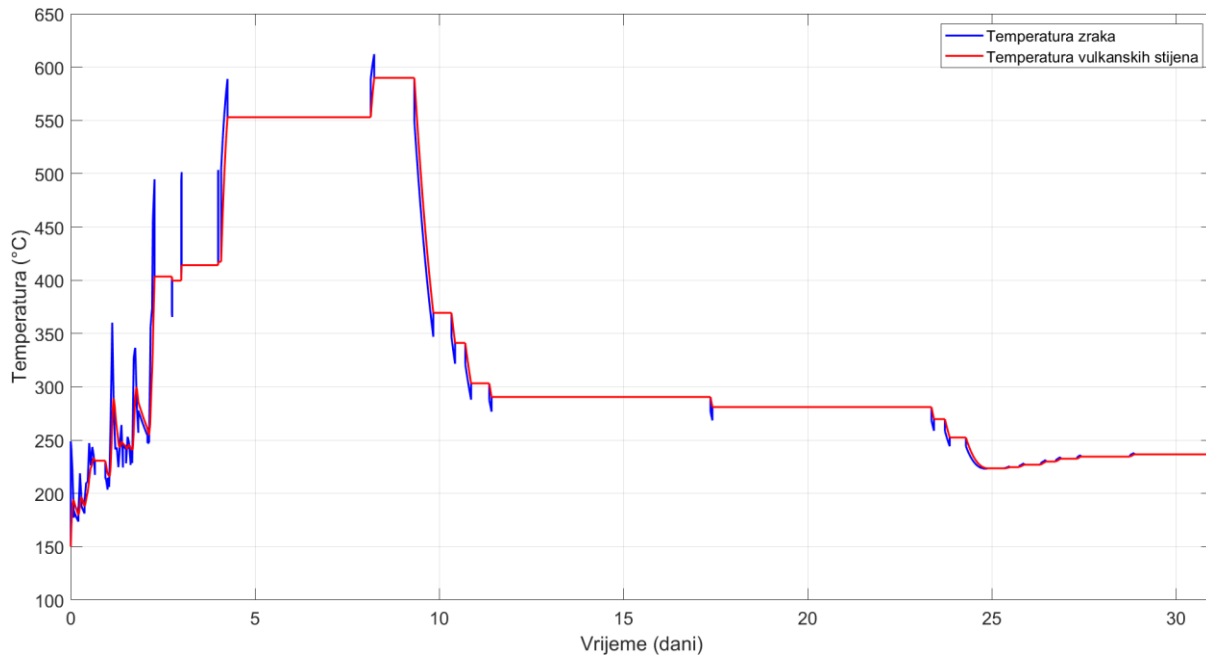


**Slika 34 Pohranjeni kapacitet električne energije iz VE i proizvedena električna energija iz Rankineovog procesa – 1. mjesec**

Pohranjeni kapacitet električne energije postepeno raste tokom prvih nekoliko dana, dostižući stabilnu razinu od oko 100 MWh osmog dana. Ovaj rast pohranjene energije ukazuje na korištenje dostupne energije iz vjetroelektrane u početku mjeseca. Nakon dostizanja maksimalnog kapaciteta, pohranjena energija ostaje konstantna, što sugerira da je baterija napunjena.

S druge strane, proizvedena električna energija, prikazana crvenom linijom ne pokazuje rast tokom prvih desetak dana. Proizvodnja dostiže stabilan nivo od oko 20 MWh nakon desetog

dana zbog povećanja cijene električne energije iznad 300 €/MWh. Iskoristivost Carnotove baterije tijekom siječnja dostiže vrijednost od 20 %.



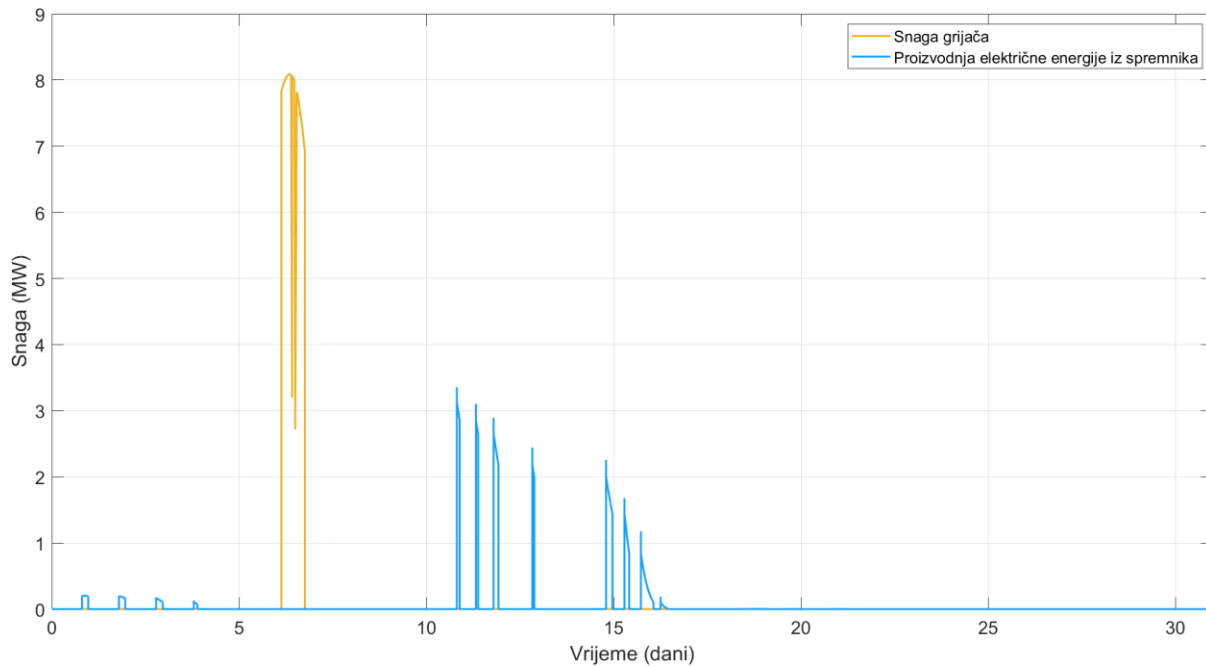
Slika 35 Temperaturni profili zraka i vulkanskih stijena u izlaznom segmentu – 1. mjesec

Primjetno je da je početkom siječnja povećana frekvencija oscilacija temperature. Zrak pokazuje veću amplitudu oscilacija u usporedbi s vulkanskim stijenama zbog svoje manje toplinske tromosti. Dok se temperatura zraka brzo prilagođava promjenama, vulkanske stijene zadržavaju toplinu duže vremena, što rezultira stabilnijim temperaturnim profilom.

Oko 10. dana, temperature oba medija dosežu svoje maksimalne vrijednosti, blizu 610 °C za zrak i oko 590 °C za vulkanske stijene. Nakon tog perioda, dolazi do postepenog hlađenja zbog pražnjenja Carnotove baterije.

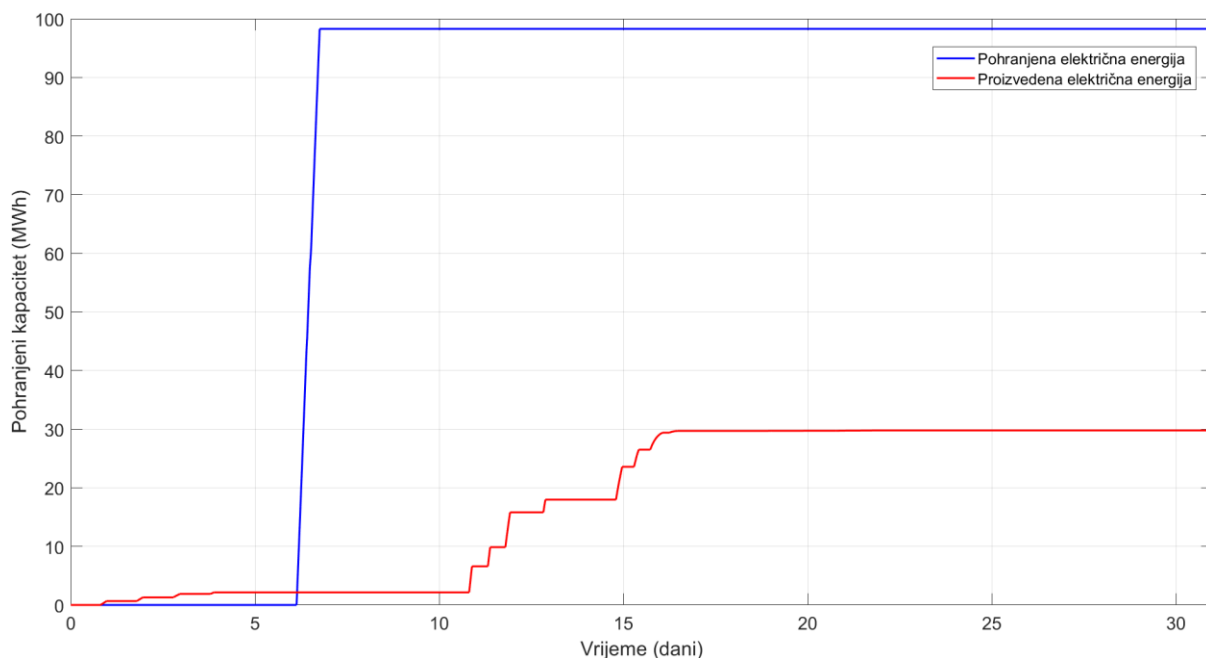
### 5.2.2. Period rada tijekom 8. mjeseca

Proučavajući dijagram s cijenama električne energije, jasno je da će proizvodnja električne energije biti veća u osmom mjesecu u usporedbi s prvim mjesecom. Ova razlika u cijenama sugerira da će biti ekonomski isplativije proizvoditi više električne energije tokom osmog mjeseca kada su cijene veće.



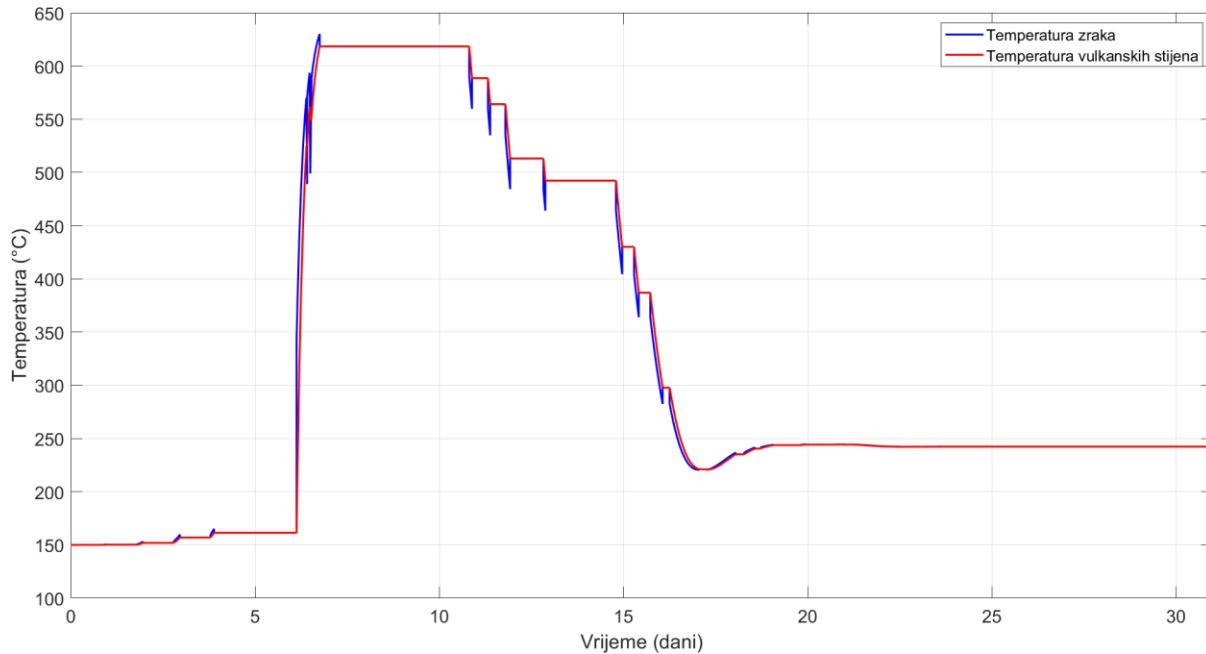
**Slika 36 Snaga grijača i proizvodnja električne energije iz spremnika – 8. mjesec**

Snaga grijača u 8. mjesecu također dostiže maksimalnu snagu od 7 MW, ali za razliku od 1. mjeseca, samo unutar vrlo kratkog vremenskog perioda oko sedmog dana. Aktivnost grijača je koncentrirana unutar vrlo kratkog vremenskog intervala, bez značajnih oscilacija prije ili poslije tog perioda. Razlog tome je cijena električne energije koja pada ispod 100 €/MWh, te počinje proces punjenja Carnotove baterije.



**Slika 37 Pohranjeni kapacitet električne energije iz VE i proizvedena električna energija iz Rankineovog procesa – 8. mjesec**

Pohranjena električna energija naglo raste oko šestog dana, dostižući maksimalni kapacitet od oko 100 MWh. Nakon toga, Carnotova baterija više ne prolazi kroz proces punjenja. Međutim, visoke cijene električne energije često aktiviraju proces pražnjenja nakon 10. dana u mjesecu. Tek nakon tog perioda, proizvodnja dostiže razinu od oko 30 MWh. Maksimalna iskoristivost u 8. mjesecu je viša nego u siječnju i iznosi 30,6 %



**Slika 38** Temperaturni profili zraka i vulkanskih stijena u izlaznom segmentu – 8. mjesec

Temperaturni profili su oblikom relativno slični onima iz 1. mjeseca. Do 6. dana nema većih promjena u temperaturi zraka i vulkanskih stijena jer se cijene električne energije nalaze u rasponu koji pripada načinu mirovanja Carnotove baterije. 6. dana, temperatura zraka doseže svoj maksimum blizu 630 °C, dok temperatura vulkanskih stijena dostiže oko 620 °C. Nakon dostizanja maksimalnih vrijednosti, dolazi do procesa pražnjenja pa i hlađenja oba medija.

## ZAKLJUČAK

U eri rastuće potražnje za obnovljivim izvorima energije, tehnologije za pohranu energije igraju ključnu ulogu u omogućavanju stabilne i pouzdane opskrbe električnom energijom. Jedna od potencijalnijih tehnologija u ovom području je Carnotova baterija. Carnotova baterija ima velika kapacitete i niske investicijske troškove ali je ograničena relativno niskom učinkovitošću pohrane. Nudi relativno jeftin i učinkovit način pohrane viška energije proizvedene iz obnovljivih izvora poput vjetroelektrana. Carnotova baterija je termalni sustav za pohranu električne energije u kojem se električna energija pohranjuje indirektno u obliku topline te naknadno te se naknadno pretvara u električnu energiju u parno-turbinskom ciklusu.

Cilj ovog diplomskog rada bio je razviti matematički model Carnotove baterije, uključujući generator pare na povratnu toplinu i grijač koji funkcionira po principu Jouleova efekta. Simulirano je ponašanje dinamike Carnotove baterije koja je kao rubni uvjet koristila električnu energiju iz projektirane vjetroelektrane koja se sastoji od 6 vjetroagregata ukupne snage oko 40 MW.

Rezultati simulacije pokazali su da Carnotova baterija kapaciteta 100 MWh može relativno učinkovito pohraniti višak energije proizvedene u vjetroelektrani i isporučiti je natrag u mrežu, uz iskoristivost od 30,6 %.

## LITERATURA

- [1] Ian Tiseo, "Distribution of carbon dioxide emissions worldwide in 2022, by sector." Accessed: May 28, 2024. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/1129656/global-share-of-co2-emissions-from-fossil-fuel-and-cement/>
- [2] R. Jacob, M. Hoffmann, J. M. Weinand, J. Linßen, D. Stolten, and M. Müller, "The future role of thermal energy storage in 100% renewable electricity systems," *Renewable and Sustainable Energy Transition*, vol. 4, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.rset.2023.100059.
- [3] "Report for Drax," 2022.
- [4] S. Rehman, L. M. Al-Hadhrami, and M. M. Alam, "Pumped hydro energy storage system: A technological review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44, pp. 586–598, Apr. 2015, doi: 10.1016/J.RSER.2014.12.040.
- [5] Y. Zhang, L. Xu, J. Li, L. Zhang, and Z. Yuan, "Technical and economic evaluation, comparison and optimization of a Carnot battery with two different layouts," *J Energy Storage*, vol. 55, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.105583.
- [6] C. D. R. Z. M. H. L. L. J. Dominik Rutz, *Mali modularni obnovljivi centralizirani toplinski i rashladni sustavi Priručnik*. 2017. [Online]. Available: <https://www.fsb.unizg.hr/>
- [7] Avery Katlyn, "Discover the three types of thermal energy storage systems." Accessed: May 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.araner.com/blog/discover-the-three-types-of-thermal-energy-storage-systems>
- [8] O. Dumont, G. F. Frate, A. Pillai, S. Lecompte, M. De paepe, and V. Lemort, "Carnot battery technology: A state-of-the-art review," *J Energy Storage*, vol. 32, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101756.
- [9] J. R. Eggers, M. von der Heyde, S. H. Thaele, H. Niemeyer, and T. Borowitz, "Design and performance of a long duration electric thermal energy storage demonstration plant at megawatt-scale," *J Energy Storage*, vol. 55, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.105780.
- [10] M. Huaiquan Zhang, "Wind Resource Assessment And Micro-Siting."
- [11] L. Landberg, *Meteorology for wind energy : an introduction*.
- [12] "Measnet\_Evaluation-of-Site-Especific-Wind-Conditions\_v3-1".



- [13] S. Brzaj, “Ocjena uspješnosti brzine i smicanja vjetra u modelu ALADIN/HR,” Diplomski rad.
- [14] “Aerodynamic roughness length - Glossary of Meteorology.” Accessed: Jun. 22, 2024. [Online]. Available: [https://glossary.ametsoc.org/wiki/Aerodynamic\\_roughness\\_length](https://glossary.ametsoc.org/wiki/Aerodynamic_roughness_length)
- [15] “EN 1991-1-4: Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions,” 2010.
- [16] “Copernicus Digital Elevation Model - Copernicus Contributing Missions Online.” Accessed: Jun. 03, 2024. [Online]. Available: <https://spacedata.copernicus.eu/collections/copernicus-digital-elevation-model>
- [17] “CORINE Land Cover — Copernicus Land Monitoring Service.” Accessed: Jun. 03, 2024. [Online]. Available: <https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover>
- [18] “Prostorno uređenje - Zavod za prostorno uređenje Zadarske županije, Zadar Hrvatska.” Accessed: Jun. 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.zpu-zadzup.hr/prostorno-uredjenje#1>
- [19] “What Is MATLAB? - MATLAB & Simulink.” Accessed: Jun. 28, 2024. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html>
- [20] T. Esence, A. Bruch, S. Molina, B. Stutz, and J. F. Fourmigué, “A review on experience feedback and numerical modeling of packed-bed thermal energy storage systems,” *Solar Energy*, vol. 153, pp. 628–654, Sep. 2017, doi: 10.1016/J.SOLENER.2017.03.032.
- [21] V. Gnielinski, *Berechnung des Wärme- und Stoffaustauschs in durchströmten ruhenden Schüttungen*, vol. 16. 1982.
- [22] P. X. Jiang, G. S. Si, M. Li, and Z. P. Ren, “Experimental and numerical investigation of forced convection heat transfer of air in non-sintered porous media,” *Exp Therm Fluid Sci*, vol. 28, no. 6, pp. 545–555, Jun. 2004, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2003.07.006.
- [23] Ganapathy V., “Steam Generators and Waste Heat Boilers: For Process and Plant Engineers.”
- [24] “Data View.” Accessed: Jul. 09, 2024. [Online]. Available: <https://transparency.entsoe.eu/transmission-domain/r2/dayAheadPrices/show?name=&defaultValue=true&viewType=GRAPH&areaType=BZN&atch=false&dateTime.dateTime=09.07.2024+00:00|CET|DAY&biddingZone.values=CTY|10YHR-HEP-----M!BZN|10YHR-HEP-----M&resolution.values=PT15M&resolution.values=PT30M&resolution.values=PT60M>

&dateTime.timezone=CET\_CEST&dateTime.timezone\_input=CET+(UTC+1)+/+CES  
T+(UTC+2)