

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ana Lipovac

Zagreb, 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Neven Duić, dipl. ing.

Dr. sc. Antun Pfeifer, mag.ing.

Student:

Ana Lipovac

Zagreb, 2025.

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

Prije svega želim izraziti iskrenu zahvalnost svom komentoru dr. sc. Antunu Pfeiferu na nesebičnoj pomoći, stručnim savjetima i podršci tijekom izrade ovog završnog rada. Njegova dostupnost, razumijevanje i korisne smjernice bili su od važnosti za uspješan završetak rada.

Zahvaljujem se i svom mentoru prof. dr. sc. Nevenu Duiću na ukazanom povjerenju i prilici da sudjelujem na LOGREENER projektu, bez kojeg ovaj završni rad ne bi bio moguć.

Posebnu zahvalnost upućujem svojoj obitelji na neiscrpnj podršci i poticaju kroz cijelo vrijeme studija. Hvala i mojim dragim prijateljima na ohrabrenju i lijepim trenucima, kao i svom dečku, na strpljenju, razumijevanju i ljubavi.

Ana Lipovac



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ana Lipovac**

JMBAG: **0035245233**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Energetsko planiranje otoka Raba korištenjem računalnog programa EnergyPLAN**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Energy Planning of the Island of Rab Using the EnergyPLAN Simulation Tool**

Opis zadatka:

Otok Rab, kao i mnoge druge otočne zajednice, suočava se s izazovima u pogledu energetske sigurnosti, velike sezonalnosti potrošnje energije i ovisnosti o energiji s kopna. Cilj ovog rada je izraditi model energetskog sustava otoka Raba koristeći računalni alat EnergyPLAN, kako bi se analizirala postojeća potrošnja energije i predložili scenariji za povećanje energetske samodostatnosti.

U obzir će se uzeti posebnosti otoka – značaj turizma, potreba za dodatnom pitkom vodom tijekom sezone te mogućnosti za korištenje energije Sunca. Na temelju prikupljenih podataka izradit će se bazni model trenutnog sustava, a zatim i scenariji s različitim stupnjem integracije obnovljivih izvora energije (OIE), električnih vozila i povećanja energetske učinkovitosti.

U okviru rada potrebno je:

1. Prikupiti podatke o energetskej potrošnji na otoku Rab (zgradarstvo, promet, industrija, turizam).
2. Procijeniti solarni potencijal i druge oblike OIE dostupnih na otoku.
3. Izraditi osnovni model postojećeg sustava i definirati scenarije dekarbonizacije u EnergyPLAN-u.
4. Usporediti scenarije prema kriterijima smanjenja emisija, udjela OIE i energetske samodostatnosti.
5. Predložiti mjere koje bi se mogle navesti u potencijalnom akcijskom planu energetski i klimatski održivog razvitka otoka Raba.

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

Zadatak zadan:

5.5.2025.

Datum predaje rada:

2. rok: 10. i 11.7. 2025.
3. rok: 18. i 19. 9. 2025.

Predviđeni datumi obrane:

2. rok: 15.7. - 18.7.2025.
3. rok: 22. 9. – 26. 9. 2025.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

prof. dr. sc. Neven Duić

dr. sc. Antun Pfeifer

prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Energetska tranzicija i izazovi otočnih sustava	1
1.2. Cilj i opseg rada	2
1.3. Struktura rada.....	3
2. METODA I ALATI.....	4
2.1. RenewIslands metoda	4
2.1.1. Mapiranje potreba	4
2.1.2. Mapiranje resursa.....	5
2.1.3. Osmišljanje scenarija s tehnologijama koje mogu koristiti dostupne resurse za pokrivanje potreba	6
2.1.4. Modeliranje scenarija	6
2.2. Softverski alat EnergyPLAN	7
3. PROMATRANI ENERGETSKI SUSTAV – OTOK RAB	8
3.1. Geografski i demografski podaci	8
3.2. Postojeći energetska sustav	8
3.2.1. Električna energija.....	8
3.2.2. Toplinska energija	9
3.2.3. Promet i goriva	9
3.3. Zakonski i okolišni okvir	9
3.4. Sustav vodoopskrbe	10
4. ANALIZA ULAZNIH PODATAKA I DEFINIRANJE SCENARIJA	11
4.1. Potrošnja električne energije.....	11
4.2. Mapiranje resursa obnovljivih izvora energije	12
4.2.1. Potencijal energije Sunca	12
4.2.2. Potencijal energije vjetra.....	14
4.2.3. Ostali obnovljivi izvori energije.....	16
4.3. Sektor transporta i električna vozila (EV)	17
4.3.1. Pretpostavke o vozilima	17
4.3.2. Modeliranje V2G sustava	18
4.4. Definiranje scenarija	18
4.4.1. Referentni scenarij „LowRES“	19
4.4.2. Scenarij umjerenog razvoja „RES“	20
4.4.3. Scenarij visoke obnovljivosti „HighRES“	22
5. REZULTATI MODELIRANJA I ANALIZA.....	24
5.1. Analiza referentnog scenarija (LowRES)	24
5.2. Analiza scenarija umjerenog razvoja (RES)	25
5.3. Analiza scenarija visoke obnovljivosti (HighRES)	26
5.4. Usporedna analiza scenarija.....	26
6. NAČINI POSTIZANJA ENERGETSKE NEOVISNOSTI	29
6.1. Energetske zajednice	29
6.2. Zeleni vodik.....	30
6.3. Uvođenje agrosolarnih sustava.....	30
6.4. Podrška elektromobilnosti.....	30
6.5. Jačanje elektroenergetske mreže i V2G tehnologija	31

7. ZAKLJUČAK.....	32
-------------------	----

POPIS SLIKA

Slika 1 Opterećenje EES-a otoka Raba aproksimacijom bez turista.....	11
Slika 2 Opterećenje EES-a otoka Raba aproksimacijom s turistima	11
Slika 3 Opterećenje TS 110/20 kV Rab	12
Slika 4 Prikaz geografske i klimatske karte otoka Raba s prosječnom godišnjom razinom insolacije, u kWh/m ² , za razdoblje 1994-2018.....	13
Slika 5 Godišnja krivulja insolacije na otoku Rabu	14
Slika 6 Srednja godišnja gustoća snage vjetra na području Hrvatske na visini od 80 m	15
Slika 7 Godišnja distribucija satnih brzina vjetra na otoku Rabu na visini od 80 m	16
Slika 8 Geotermalni gradijenti u Republici Hrvatskoj	17
Slika 9 Primjer određivanja potrebnog instaliranog kapaciteta solara putem stranice SolarShop	20
Slika 10 Mjesečno pokriće potražnje za električnom energijom [kW] u LowRES scenariju..	24
Slika 11 Mjesečno pokriće potražnje za električnom energijom [kW] u RES scenariju	25
Slika 12 Mjesečno pokriće potražnje za električnom energijom [kW] u HighRES scenariju .	26
Slika 13 CO ₂ emisije u kt za tri različita scenarija	27

POPIS TABLICA

Tablica 1 Mapiranje potreba za odabrani energetski sustav	4
Tablica 2 Mapiranje resursa za odabrani energetski sustav	5
Tablica 3 Općeniti podaci o Rabu	8
Tablica 4 Procjena ukupnog broja vozila na otoku Rabu.....	17
Tablica 5 Broj vozila prema vrsti goriva.....	18
Tablica 6 Skaliranje broja električnih automobila za otok Rab	18
Tablica 7 Sažeti prikaz scenarija	19
Tablica 8 Ulazni parametri za LowRES scenarij	20
Tablica 9 Ulazni parametri za RES scenarij.....	22
Tablica 10 Ulazni parametri za HighRES scenarij.....	23

SAŽETAK

Ovaj završni rad detaljno proučava mogućnosti energetske tranzicije otoka Raba usmjerenih na povećanje udjela obnovljivih izvora energije (OIE) i elektrifikaciju transportnog sektora. Primjenom metodologije RenewIslands i softverskog alata EnergyPLAN razvijena su i analizirana tri ključna scenarija razvoja energetskog sustava do 2050. godine: referentni (LowRES), umjereni (RES) i visokih ciljeva (HighRES). Rezultati analize pokazuju da otok Rab, zahvaljujući obilju sunčanih sati i povoljnom poljoprivrednom zemljištu, ima značajan potencijal za masovnu implementaciju fotonaponskih i agrosolarnih sustava. Nadalje, integracija sustava Vehicle-to-Grid (V2G) i potpuna elektrifikacija osobnog prometa doprinose značajnoj fleksibilnosti i stabilnosti mreže. Rad pokazuje da je tehnički moguće postići potpunu energetsku neovisnost i dekarbonizaciju otoka uz očuvanje lokalnih gospodarskih aktivnosti i okoliša. Također se ističe uloga energetskih zajednica i zelenog vodika kao dodatnih alata za ostvarenje dugoročne održivosti i otpornosti otočne zajednice. Rezultati ovog rada predstavljaju važan doprinos planiranju održivog razvoja i mogu poslužiti kao model drugim otočnim zajednicama sa sličnim izazovima.

SUMMARY

This thesis thoroughly investigates the possibilities for energy transition on the island of Rab, focusing on increasing the share of renewable energy sources (RES) and electrifying the transport sector. By applying the RenewIslands methodology and the EnergyPLAN software tool, three key scenarios for the energy system development by 2050 were developed and analyzed: baseline (LowRES), moderate (RES), and ambitious targets (HighRES). The analysis results indicate that Rab Island, benefiting from abundant sunshine and suitable agricultural land, has significant potential for widespread deployment of photovoltaic and agrosolar systems. Furthermore, integration of Vehicle-to-Grid (V2G) systems and full electrification of personal transport contribute substantially to grid flexibility and stability. The thesis demonstrates the technical feasibility of achieving complete energy independence and decarbonization of the island while preserving local economic activities and environmental quality. Additionally, the roles of energy communities and green hydrogen are highlighted as complementary tools for achieving long-term sustainability and resilience of the island community. The outcomes of this research provide important insights for sustainable planning and can serve as a model for other island communities facing similar challenges.

1. UVOD

U kontekstu globalne energetske tranzicije, otočni sustavi predstavljaju jedinstven izazov i priliku za implementaciju održivih energetske rješenja. Otok Rab, kao dio jadranskog arhipelaga, suočava se s tipičnim problemima energetske izoliranosti, ovisnosti o uvozu energenata i ograničenom fleksibilnošću sustava, što posebno dolazi do izražaja pri integraciji varijabilnih obnovljivih izvora energije (OIE). Upravo ti izazovi čine ga idealnim kandidatom za tranziciju prema pametnom i energetski otpornijem sustavu [1].

Ovaj rad istražuje mogućnosti energetske tranzicije otoka Raba kroz integraciju naprednih tehnoloških rješenja, s posebnim naglaskom na povezivanje energetske i transportnog sektora. Analizira se potencijal elektrifikacije voznog parka i primjene sustava „Vehicle-to-Grid“ (V2G), gdje električna vozila postaju aktivni sudionici u balansiranju mreže pružajući usluge pohrane energije [2].

Cilj rada je izraditi i analizirati različite energetske scenarije za otok Rab za buduća razdoblja koristeći softverski alat EnergyPLAN. Analizom referentnog, umjerenog i ambicioznog scenarija istražiti će se potencijal otoka za povećanje energetske neovisnosti, udjela obnovljivih izvora energije te smanjenje emisija CO₂.

1.1. Energetska tranzicija i izazovi otočnih sustava

Ovisnost o uvozu fosilnih goriva, najčešće dizela za proizvodnju električne energije i benzina za transport, čini otoke ekonomski ranjivima na fluktuacije cijena energenata na globalnom tržištu te ekološki opterećenima zbog visokih emisija stakleničkih plinova. Ograničen kapacitet ili potpuni nedostatak podmorskih kabela za povezivanje s kopnom mrežom dodatno smanjuje sigurnost opskrbe i stabilnost sustava.

Paradoksalno, upravo ta izoliranost čini otoke idealnim "živim laboratorijima" za implementaciju naprednih energetske konceptata. Njihove jasno definirane granice, manji opseg sustava i izravna povezanost lokalne zajednice s energetskim pitanjima omogućuju bržu i učinkovitiju implementaciju integriranih rješenja. Otoci često posjeduju i izniman potencijal obnovljivih izvora energije, prvenstveno sunca i vjetra, što ih čini prirodnim kandidatima za energetske tranziciju [3].

Međutim, visoka penetracija varijabilnih OIE, poput fotonaponskih sustava i vjetroelektrana, unosi nove tehničke izazove. Njihova varijabilna priroda proizvodnje (ovisnost o dobu dana i

vremenskim uvjetima) zahtijeva napredne mehanizme za uravnoteženje proizvodnje i potrošnje. Ključna rješenja za ovaj problem leže u sustavima za pohranu energije i upravljanju potrošnjom.

U tom kontekstu, povezivanje sektora postaje ključna strategija, a najperspektivnije je povezivanje elektroenergetskog i transportnog sektora. Elektrifikacija transporta, odnosno prelazak na električna vozila, otvara novu dimenziju u planiranju energetske sustava. Električna vozila, sa svojim baterijama, predstavljaju značajan, mobilan i distribuiran kapacitet za pohranu energije. Kroz pametno punjenje i V2G tehnologiju, vozni park prestaje biti samo pasivni potrošač i postaje aktivni resurs koji može apsorbirati viškove energije iz OIE (npr. punjenje tijekom sunčanog dana) i vraćati energiju u mrežu tijekom vršne potrošnje ili nedostatka proizvodnje (npr. pražnjenje u večernjim satima). Integracijom OIE i pametne elektrifikacije transporta, otoci mogu svoje najveće izazove pretvoriti u temelje za izgradnju održivog, samodostatnog i ekonomski isplativog energetske sustava [4].

1.2. Cilj i opseg rada

Osnovni cilj ovog završnog rada je istražiti tehničke mogućnosti i potencijale za energetske tranzicije otoka Raba prema održivom i energetski neovisnijem sustavu. Rad se fokusira na izradu i analizu tri različita razvojna scenarija energetske sustava otoka za horizonte 2025., 2030. i 2035. godine.

Specifični ciljevi rada su:

1. Analizirati postojeće energetske stanje otoka Raba, s naglaskom na potrošnju električne energije i sektor transporta.
2. Mapirati dostupne lokalne obnovljive izvore energije, prvenstveno potencijal energije sunca i vjetra.
3. Razviti referentni scenarij ("LowRES") koji predstavlja nastavak postojećih trendova te dva alternativna scenarija ("RES" i "HighRES") koji modeliraju umjerenu i ambicioznu integraciju obnovljivih izvora i električnih vozila.
4. Kvantificirati doprinos V2G tehnologije stabilnosti mreže i povećanju samoodrživosti otoka.
5. Usporediti rezultate scenarija prema ključnim pokazateljima: udjelu OIE u ukupnoj potrošnji, stupnju energetske neovisnosti (smanjenju uvoza s kopna) i smanjenju emisija CO₂.

Opseg rada obuhvaća modeliranje elektroenergetskog i transportnog sektora otoka Raba. Analiza ne uključuje detaljno modeliranje toplinskog sektora (grijanje i hlađenje), iako se njihov utjecaj na potrošnju električne energije uzima u obzir. Tehno-ekonomska analiza provodi se na razini usporedbe tehničkih performansi i energetske bilanci, bez detaljne analize investicijskih troškova i isplativosti.

1.3. Struktura rada

Za postizanje postavljenih ciljeva u radu se primjenjuje metodološki pristup koji se temelji na računalnom modeliranju i analizi scenarija. Metodologija se sastoji od četiri ključna koraka, po uzoru na pristup razvijen za energetske analize otočnih sustava:

1. Analiza postojećeg stanja i prikupljanje podataka
2. Definiranje scenarija
3. Modeliranje u softveru EnergyPLAN
4. Analiza i usporedba rezultata

Struktura rada prati navedene metodološke korake. Nakon Uvoda, drugo poglavlje detaljno prikazuje promatrani sustav, otok Rab. Treće poglavlje opisuje korištenu metodologiju i softverski alat. Četvrto poglavlje posvećeno je detaljnoj analizi svih ulaznih podataka i pretpostavki korištenih za definiranje scenarija. U petom poglavlju prezentiraju se i analiziraju rezultati simulacija za svaki od tri scenarija, dok šesto poglavlje pruža pregled mogućih načina i strategija za postizanje energetske neovisnosti otoka Rab. Sedmo poglavlje donosi zaključke rada, sažimajući ključne nalaze i rezultate dobivene analizom svih modeliranih scenarija.

2. METODA I ALATI

2.1. RenewIslands metoda

RenewIslands metoda predstavlja strukturirani, četverofazni analitički pristup osmišljen za planiranje održivih energetske i resursnih sustava na otocima. Cilj metodologije je omogućiti sustavnu procjenu alternativnih scenarija razvoja koji se temelje na integraciji lokalno dostupnih resursa i naprednih tehnologija, s konačnim ciljem povećanja energetske neovisnosti i smanjenja utjecaja na okoliš. Metodologija se provodi kroz sljedeća četiri koraka [5]:

1. mapiranje potreba,
2. mapiranje resursa,
3. osmišljanje scenarija s tehnologijama koje mogu koristiti dostupne resurse za pokrivanje potreba,
4. modeliranje scenarija.

2.1.1. Mapiranje potreba

U ovom početnom koraku analiziraju se sve potrebe otočne zajednice. To ne uključuje samo energetske potrebe poput električne energije, grijanja, hlađenja i goriva za transport, već i druge ključne resurse i usluge kao što su opskrba vodom te zbrinjavanje otpada i otpadnih voda. Razina i karakteristike svake potrebe (npr. visoka, niska, koncentrirana ili disperzirana) definiraju se na temelju lokalnih uvjeta, klime i specifičnosti zajednice kako bi se stvorila cjelovita slika o zahtjevima otoka.

Tablica 1 Mapiranje potreba za odabrani energetski sustav

Potrebe	Razina	Geografska distribucija
Električna energija	Srednja	Koncentrirana
Toplina	Niska	Disperzirana
Rashladna energija	Niska	Disperzirana
Gorivo za transport	Niska	Male udaljenosti
Voda	Srednja	Disperzirana
Obrada otpada	Niska	Disperzirana
Obrada otpadnih voda	Niska	Disperzirana

Procjena potreba za otok Rab, prikazana u Tablici 2, temelji se na analizi dostupnih statističkih podataka, lokalnih razvojnih planova te specifičnosti otoka kao izražene turističke destinacije, gdje ljetna vršna potražnja značajno utječe na godišnju bilancu.

Potrebe za električnom energijom i vodom definirane su kao srednje, što je posljedica značajnog povećanja broja korisnika tijekom ljetnih mjeseci. Dok je elektroenergetski sustav centraliziran i stoga koncentriran, vodoopskrbna mreža je disperzirana do pojedinačnih objekata.

Potrebe za toplinskom i rashladnom energijom su niske zbog mediteranske klime, a zadovoljavaju se disperzirano putem individualnih uređaja. Gorivo za transport također ima nisku razinu potražnje, uvjetovanu malim udaljenostima na otoku. Sustavi obrade otpada i otpadnih voda su karakteristično disperzirani i predstavljaju logistički izazov, no njihova energetska potražnja je niska u ukupnoj bilanci.

S obzirom na postavljene ciljeve ovog rada, fokus daljnje analize i modeliranja bit će na zadovoljavanju potreba za električnom energijom. Analizirat će se scenariji s visokim udjelom obnovljivih izvora energije, prvenstveno sunčanih elektrana, te njihov utjecaj na elektroenergetsku mrežu otoka. Potrebe za vodom, otpadom i transportom, iako su ključne za funkcioniranje otoka, neće biti detaljno modelirane u energetsom smislu, već se njihova potrošnja smatra pozadinskom u odnosu na glavni predmet istraživanja.

2.1.2. Mapiranje resursa

Nakon definiranja potreba, slijedi popisivanje i procjena svih dostupnih resursa. Analiziraju se lokalno dostupni, obnovljivi izvori energije (vjetar, sunce, geotermalna energija, biomasa, hidro potencijal), ali i postojeći uvezeni resursi (npr. naftni derivati) i infrastruktura poput mrežnih priključaka. Zbog izoliranosti otoka i visokih troškova uvoza, lokalni resursi koji inače ne bi bili ekonomski isplativi na kopnu, ovdje mogu postati konkurentni i predstavljati temelj za održivi razvoj.

Tablica 2 Mapiranje resursa za odabrani energetska sustav

Resurs	Razina
Lokalna primarna energija	
Vjetar	Srednja
Insolacija	Visoka

Vodeni potencijal (visinski pad)	Niska
Biomasa	Niska
Geotermalni potencijal	Niska
Infrastruktura za uvoz energije	
Mrežna povezanost	Jaka
Cjevovod prirodnog plina	Ne postoji
Terminal UPP	Ne postoji
Naftni terminal/rafinerija	Ne postoji
Terminal naftnih derivata	Ne postoji
Voda	
Padaline	Niske
Podzemne vode	Niske
Vodovod	Da
Morska voda	Da

2.1.3. Osmišljanje scenarija s tehnologijama koje mogu koristiti dostupne resurse za pokrivanje potreba

U ovom koraku spajaju se identificirane potrebe s dostupnim resursima. Razmatraju se različite tehnologije za pretvorbu energije, opskrbu vodom i zbrinjavanje otpada. Ključni dio ovog koraka je analiza izvedivosti sustava za pohranu energije te mogućnosti integracije različitih tokova kako bi se povećala učinkovitost. Na temelju toga, razvijaju se različiti mogući scenariji za budući energetska i resursni sustav otoka.

2.1.4. Modeliranje scenarija

Posljednji korak uključuje detaljnu provjeru održivosti scenarija razvijenih u prethodnom koraku. Budući da su tokovi resursa i potražnje vremenski ovisni, koriste se računalni modeli za simulaciju rada svakog scenarija (često na bazi satnih podataka). Ovim modeliranjem provjerava se tehnička izvedivost (mogu li sustavi zadovoljiti potražnju u svakom trenutku) i

ekonomska isplativost. Na taj način, nerealni scenariji se odbacuju, a donositeljima odluka pružaju se konkretni podaci za odabir najboljeg rješenja.

2.2. Softverski alat EnergyPLAN

Za analizu i modeliranje budućih energetske scenarija otoka Raba u ovom radu koristi se softverski alat EnergyPLAN. Razvijen od strane Istraživačke grupe za održivo energetsko planiranje na Sveučilištu Aalborg u Danskoj, EnergyPLAN je napredan računalni model za planiranje i analizu energetske sustava na nacionalnoj i regionalnoj razini. Zbog svoje fleksibilnosti i sveobuhvatnog pristupa, alat je široko prihvaćen u akademskoj zajednici i među energetskim planerima diljem svijeta za istraživanje tranzicije prema 100% obnovljivim energetskim sustavima.

Osnovna svrha EnergyPLAN-a je pomoći u dizajniranju tehnički i ekonomski optimiziranih energetske sustava te pružiti uvid u posljedice različitih energetske strategija. Model funkcionira na principu analitičke simulacije koja balansira ponudu i potražnju energije na satnoj razini tijekom cijele godine. Time se omogućuje detaljna analiza interakcije između varijabilnih obnovljivih izvora energije, poput sunca i vjetera, i fleksibilnih tehnologija poput sustava za pohranu energije, pametnog upravljanja potrošnjom i povezivanja sektora [6].

EnergyPLAN integrira različite sektore energetskog sustava, uključujući elektroenergetski, toplinski (daljinsko grijanje), rashladni, industrijski i transportni sektor. Za potrebe ovog rada, ključne funkcionalnosti alata su:

- Mogućnost unosa satnih profila potrošnje električne energije i transportnih potreba,
- Integracija obnovljivih izvora,
- Povezivanje sektora i pohrana energije.

Kao rezultat simulacije, EnergyPLAN pruža detaljne godišnje energetske bilance, uključujući ukupnu proizvodnju i potrošnju energije po tehnologijama, udio obnovljivih izvora, uvoz i izvoz energije te emisije CO₂. Na taj način, alat omogućuje kvantitativnu usporedbu različitih scenarija i identifikaciju najučinkovitijih strategija za postizanje energetske tranzicije otoka Raba.

3. PROMATRANI ENERGETSKI SUSTAV – OTOK RAB

3.1. Geografski i demografski podaci

Tablica 3 Općeniti podaci o Rabu

Površina otoka	90,84 km ²
Dužina otoka	22 km
Širina otoka	11 km
Duljina obale	103,2 km
Broj stanovnika	8352
Veća naselja	Rab, Lopar, Barbat, Banjol, Palit
Cestovna infrastruktura	120 km
Vrhovi	Kamenjak (408 m)

Velebitski kanal dijeli otok Rab od kopna, a najbliži je kopnu na krajnjem jugoistočnom rtu, i to 1800 m. Od otoka Paga na jugoistoku dijeli ga kanal Paško tijesno, na zapadu prema otocima Cresu i Lošinju nalazi se Kvarnerić, a od otoka Krka na sjeverozapadu dijele ga Senjska vrata. Gospodarstvo otoka Raba temelji se na dugoj tradiciji turizma i ugostiteljstva. Ribarstvo i marikultura također doprinose lokalnom gospodarstvu [7].

Važno je napomenuti da na otoku Rabu nema značajnije industrijske proizvodnje koja bi predstavljala velikog i konstantnog potrošača električne energije tijekom cijele godine.

3.2. Postojeći energetska sustav

Otok Rab pripada skupini kvarnerskih otoka i administrativno je dio Primorsko-goranske županije. Energetski sustav otoka karakterizira visoka ovisnost o uvozu energije s kopna, uz ograničene lokalne izvore. Kao i većina hrvatskih otoka, Rab je povezan s nacionalnom elektroenergetskom mrežom, a primarna opskrba električnom energijom odvija se putem podmorskih kabela.

3.2.1. Električna energija

Otok se trenutno napaja putem elektroenergetske mreže Hrvatske elektroprivrede, pri čemu je ključna uloga trafostanice 110/20 kV Rab, smještene u blizini Grada Raba. Primarna opskrba otoka osigurana je dvjema 110 kV vezama iz pravca otoka Krka i Paga, koje ulaze u trafostanicu, iz koje se potom preko 20 kV kablskih veza distribuira energija po cijelom otoku.

Kapacitet trafostanice iznosi 2×20 MVA, što je dovoljno za pokrivanje potrošnje čak i tijekom špice turističke sezone, kada potrošnja doseže gotovo 20 MW. Položeni su i novi podmorski kabeli za visoki napon, kojima su zamijenjeni postojeći 20 kV podmorski kabeli. Ove 20 kV kableske veze služe kao rezervno napajanje dijela otoka u slučaju kvara na primarnoj trafostanici [8].

Na samom otoku postoje manji solarni sustavi (uglavnom na privatnim kućanstvima i turističkim objektima), no njihov udio u ukupnoj potrošnji električne energije je zanemariv. Ne postoji centralizirana proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora koja bi mogla značajnije pridonijeti energetske samodostatnosti.

3.2.2. Toplinska energija

Opskrba toplinskom energijom na Rabu uglavnom se temelji na individualnim sustavima grijanja i hlađenja. Najčešće se koriste klimatizacijski uređaji, električni bojleri i manji sustavi na loživo ulje ili drvo. U turističkim objektima sve je prisutnije korištenje solarnih toplinskih kolektora za pripremu potrošne tople vode, no riječ je o lokaliziranim rješenjima. Sustav centralizirane toplinske opskrbe ne postoji.

3.2.3. Promet i goriva

Promet na otoku Rab u potpunosti ovisi o fosilnim gorivima (benzin i dizel). Trajektne linije koje povezuju Rab s kopnom (linije Rab–Stinica i Rab–Valbiska) također koriste fosilna goriva, što dodatno povećava ugljični otisak i ovisnost o vanjskoj opskrbi. Infrastruktura za električna vozila (EV) tek se počinje razvijati – na otoku postoji nekoliko javnih AC punionica nižih snaga, dok brze DC punionice još nisu široko dostupne.

3.3. Zakonski i okolišni okvir

Prema Uredbi o uređenju i zaštiti zaštićenog obalnog područja mora (NN 128/2004), otok Rab u cijelosti spada pod zaštićeno obalno područje (ZOP), što nosi niz ograničenja u prostornom planiranju i provedbi infrastrukturnih projekata, osobito u području energetike. U članku 5. navedene uredbe jasno je propisano da se u ZOP-u ne može planirati niti graditi građevine namijenjene za istraživanje i iskorištavanje mineralnih sirovina, osim morske soli, kao ni za iskorištavanje snage vjetra za proizvodnju električne energije. Nadalje, članak 6. dodatno ograničava gradnju unutar građevinskog područja naselja, u pojasu do 70 metara od obalne crte, gdje se ne smiju planirati niti graditi objekti za proizvodnju koji nisu funkcionalno povezani s morem i morskom obalom [9].

Osim toga, veliki dio teritorija i akvatorija otoka Raba nalazi se unutar ekološke mreže Natura 2000, koja štiti posebno vrijedna staništa i vrste značajne za Europsku uniju. Među zaštićenim područjima na Rabu ističu se Posebni rezervat šumske vegetacije Dundo, Park-šuma Komrčar i Značajni krajobraz Lopar [10].

Obe odredbe stvaraju prepreku izgradnji vjetroelektrana.

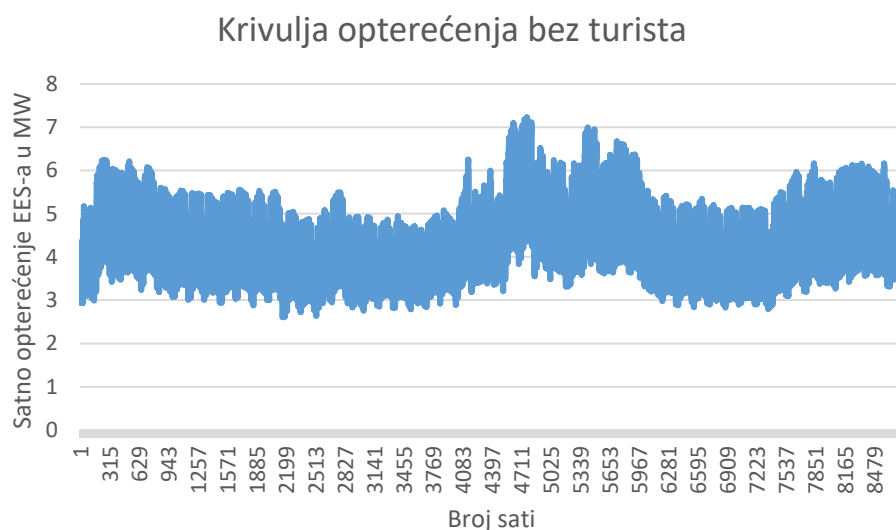
3.4.Sustav vodoopskrbe

Trenutno se opskrba vodom za piće na Rabu temelji na dva glavna izvora. Glavninu opskrbe čini vodovod Hrvatsko primorje – južni ogranak, koji se koristi tijekom cijele godine s maksimalnim kapacitetom od 126 l/s. Dodatne količine vode osiguravaju se iz lokalnih izvora otoka Raba (izvor Mlinica, bušotine Gvačići I i II te Perići), čije se korištenje intenzivira u ljetnim mjesecima te po potrebi u kriznim situacijama, s izdašnošću od 78 l/s. Ukupna raspoloživa količina vode iznosi 204 l/s, što, barem nominalno, zadovoljava sadašnje potrebe otoka. Međutim, s tehničke strane, opterećenje distribucijskog sustava tijekom ljetnog perioda doseže granice tehničkih mogućnosti, ukazujući na potrebu za optimizacijom i potencijalnim unaprjeđenjima infrastrukture [11].

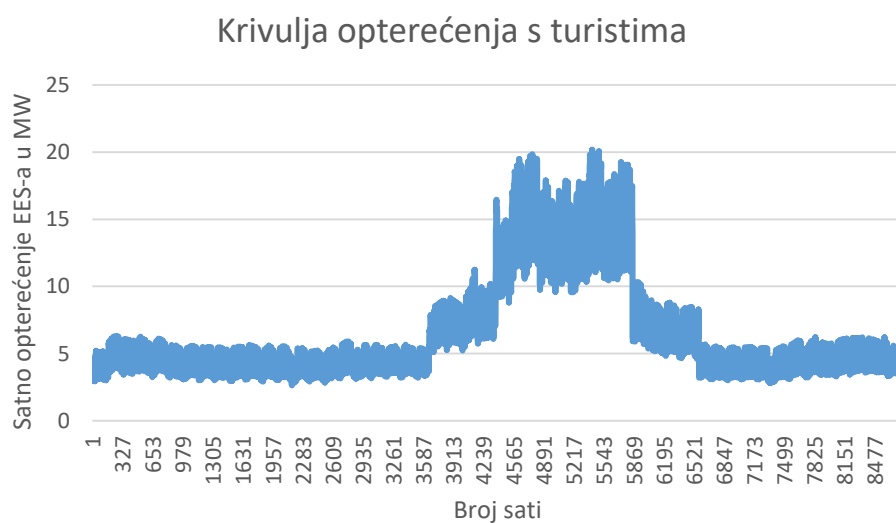
4. ANALIZA ULAZNIH PODATAKA I DEFINIRANJE SCENARIJA

4.1. Potrošnja električne energije

Podaci potrošnje električne energije za otok Rab dobiveni su na sljedeći način: najprije su skinuti podaci za ENTSOE-a za cijelu Hrvatsku te su skalirani za otok Rab prema broju stanovnika [12]. U obzir su uzeti i podaci o broju turista za svaki mjesec u 2022. godini (Izvješće o turističkom prometu) koji su pribrojeni broju stanovnika otoka Raba. Time su dobivene satne krivulje potrošnje električne energije, jedna uzimajući u obzir broj posjetitelja, a druga bez.



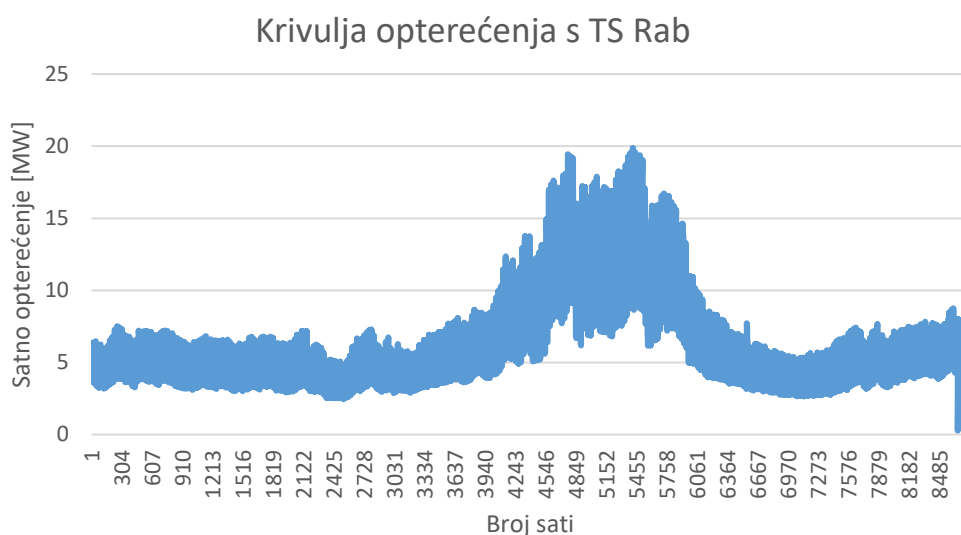
Slika 1 Opterećenje EES-a otoka Raba aproksimacijom bez turista



Slika 2 Opterećenje EES-a otoka Raba aproksimacijom s turistima

Oblik krivulje opterećenja elektroenergetskog sustava (EES) otoka Raba jasno odražava njegovu gospodarsku strukturu. Vidljiv je značajan porast potrošnje tijekom ljetnih mjeseci, što je izravna posljedica vrhunca turističke sezone i povećane aktivnosti uslužnog sektora. Nasuprot tome, zimsko razdoblje karakterizira znatno niže opterećenje, što je tipično za otočne sustave bez značajnije industrijske potrošnje koja bi održavala potražnju konstantnom tijekom godine.

Ovi satni podaci o potrošnji, koji obuhvaćaju 8784 točaka za svaki sat u godini, unose se u EnergyPLAN kao normalizirane vremenske serije. Na temelju sumiranja ovih vrijednosti, ukupna godišnja potrošnja električne energije za otok Rab procijenjena je na 58,55 GWh. Usporedba ove procijenjene vrijednosti sa stvarnim podacima dobivenim s TS Rab potvrđuje podudarnost aproksimacije s realnim stanjem, što osigurava kvalitetnu podlogu za daljnju analizu.



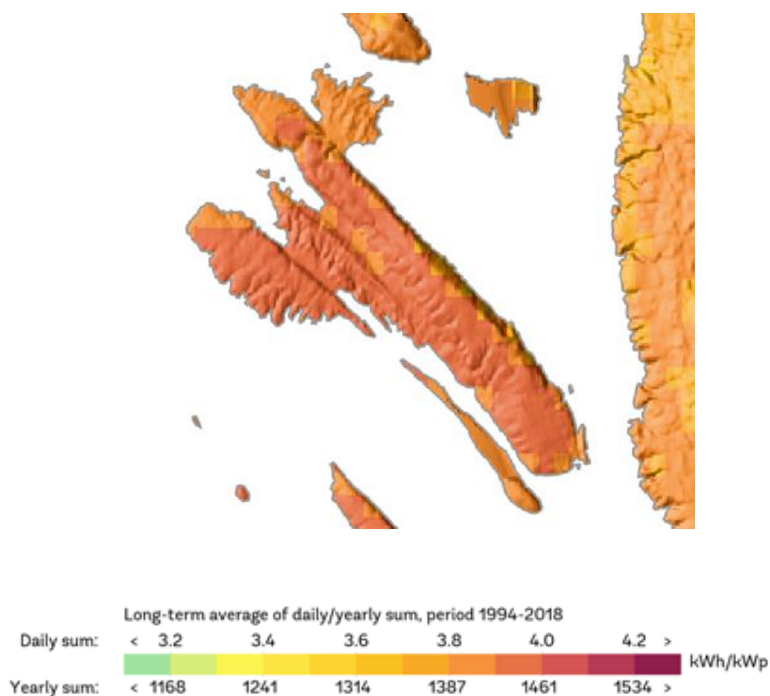
Slika 3 Opterećenje TS 110/20 kV Rab

4.2. Mapiranje resursa obnovljivih izvora energije

4.2.1. Potencijal energije Sunca

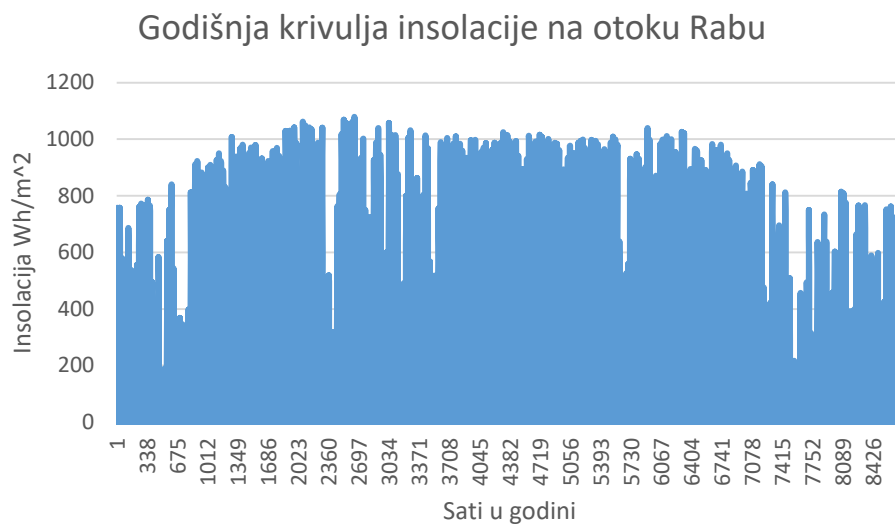
Za potrebe modeliranja fotonaponskih elektrana u EnergyPLANu moraju se imati satne podatke ozračenosti površine. Za procjenu insolacije korišten je alat Renewables.ninja [13], koji omogućuje simulaciju proizvodnje energije iz obnovljivih izvora na temelju stvarnih meteoroloških podataka. U ovom slučaju, korišteni su podaci za 2019. godinu.

U simulaciji je postavljen nagib (tilt) modula od 35 stupnjeva, što otprilike odgovara optimalnom kutu za maksimalno iskorištavanje sunčeve energije na geografskom položaju Hrvatske. Azimut je postavljen na 180 stupnjeva, što znači da su paneli orijentirani točno prema jugu, kako bi se osigurala najveća moguća godišnja proizvodnja energije, jer je južna orijentacija najpovoljnija na sjevernoj hemisferi.



Slika 4 Prikaz geografske i klimatske karte otoka Raba s prosječnom godišnjom razinom insolacije, u kWh/m², za razdoblje 1994-2018.

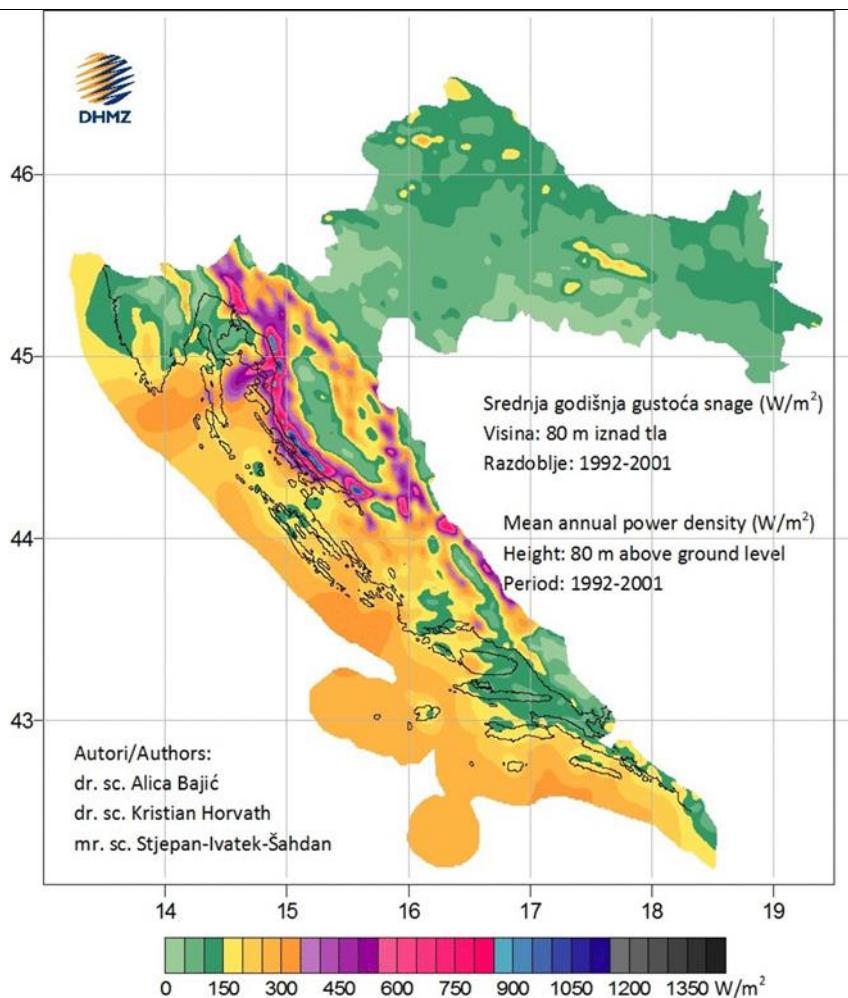
Na temelju tih podataka dolazimo do godišnje krivulje insolacije na otoku Rabu. Uočava se velik udio sunčanih sati na otoku Rabu, što predstavlja dobar potencijal za postavljanje fotonaponskih panela.



Slika 5 Godišnja krivulja insolacije na otoku Rabu

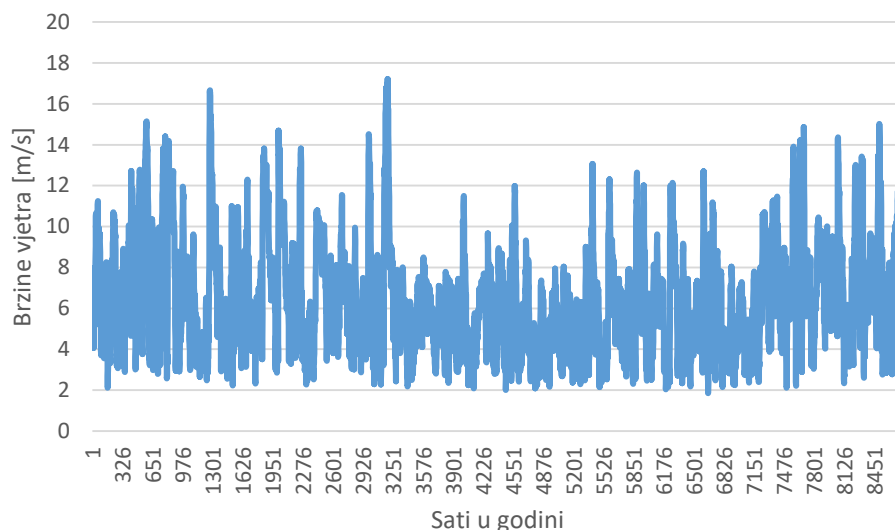
4.2.2. Potencijal energije vjetra

Uz energiju sunca, energija vjetra predstavlja drugi ključni obnovljivi resurs za energetske tranzicije otoka Raba. Međutim, za razliku od solarnog potencijala koji je relativno ujednačen, iskoristivost energije vjetra značajno ovisi o mikrolokaciji, topografiji terena te zakonskim i okolišnim ograničenjima.



Slika 6 Srednja godišnja gustoća snage vjetra na području Hrvatske na visini od 80 m

Za kvantifikaciju potencijala vjetra na području otoka Raba korišten je softverski alat Renewables.ninja [13], koji omogućuje simulaciju brzina vjetra na temelju satelitskih i meteoroloških podataka. Preuzeti su satni podaci o brzinama vjetra za referentnu 2019. godinu na visini od 80 metara iznad tla, što odgovara prosječnoj visini osi modernih vjetroturbina pogodnih za kopnene lokacije. Grafički prikaz godišnje distribucije brzina vjetra prikazan je na Slici 6.



Slika 7 Godišnja distribucija satnih brzina vjetra na otoku Rabu na visini od 80 m

Važno je napomenuti da, unatoč postojećem tehničkom potencijalu, stvarna implementacija vjetroelektrana na otoku Rabu strogo je ograničena prostorno-planskom i okolišnom regulativom, kako je detaljnije opisano u poglavlju 2.3. Stoga će se u daljnjem modeliranju scenarija ovaj resurs koristiti s oprezom, uzimajući u obzir navedena ograničenja.

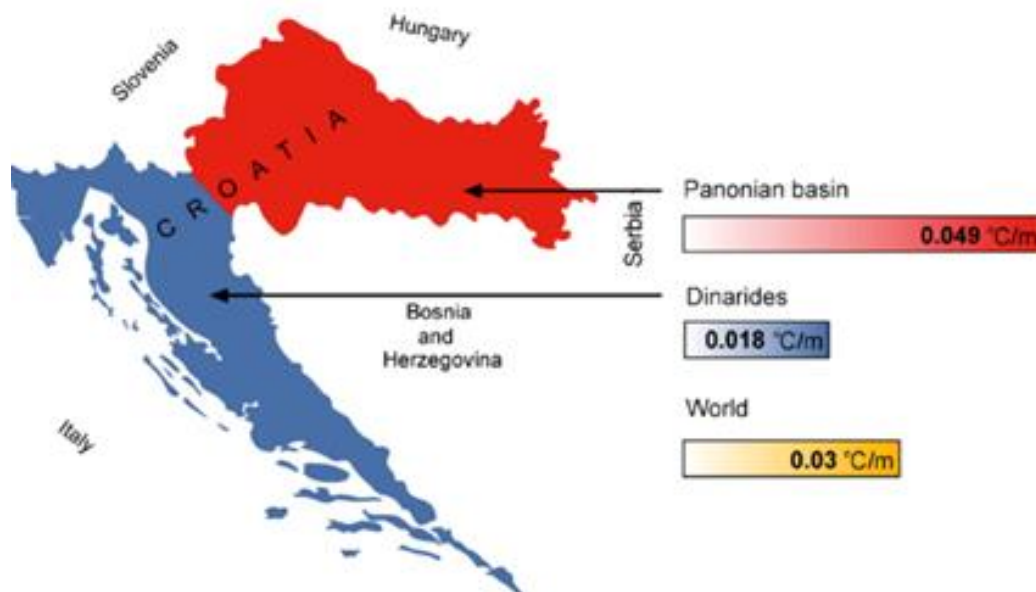
4.2.3. Ostali obnovljivi izvori energije

Osim dominantnih potencijala sunca i vjetra, za cjelovitu analizu razmatrani su i drugi obnovljivi izvori energije na otoku Rabu, poput geotermalne energije i biomase.

Geotermalni potencijal na području otoka Raba, kao i na većem dijelu Dinarida, ocjenjuje se kao nizak. Krški reljef čini područje geološki nepovoljnim za duboke bušotine i klasične geotermalne elektrane. Iako prostorni planovi dozvoljavaju izvedbu plićih, vertikalnih bušotina za korištenje topline podzemlja, ovo rješenje je prvenstveno primjenjivo za sustave grijanja i hlađenja pojedinačnih objekata pomoću dizalica topline. S obzirom na to da se ovaj rad fokusira na proizvodnju električne energije, geotermalni potencijal se neće dalje modelirati.

Biomasa, iako prisutna na otoku u obliku drvne mase i poljoprivrednih ostataka, primarno se koristi na tradicionalan način za ogrjev u kućanstvima. Zbog nedostatka organiziranog sustava prikupljanja i prerade, kao i relativno malih raspoloživih količina, potencijal za proizvodnju električne energije iz biomase smatra se zanemarivim za potrebe ove analize.

S obzirom na navedeno, daljnje modeliranje energetske scenarija temeljit će se isključivo na potencijalima energije sunca i vjetra kao ključnim nositeljima energetske tranzicije otoka.



Slika 8 Geotermalni gradijenti u Republici Hrvatskoj

4.3. Sektor transporta i električna vozila (EV)

Sektor transporta predstavlja značajnog potrošača energije na otoku Rabu i ključan je element u razmatranju sveobuhvatne energetske tranzicije. Elektrifikacija voznog parka nudi dvostruku korist: smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima i emisija stakleničkih plinova, te pružanje fleksibilnosti elektroenergetskom sustavu kroz V2G tehnologiju.

4.3.1. Pretpostavke o vozilima

S obzirom da ne postoje javno dostupni podaci o točnom broju i strukturi voznog parka specifično za otok Rab, u ovom radu provedena je procjena metodom skaliranja. Kao osnova za izračun korišteni su podaci iz dokumenta Vrste vozila po županijama i vrstama goriva za 2024. godinu [14], koji sadrži detaljne informacije za Primorsko-goransku županiju.

Prvi korak bio je utvrditi ukupan broj vozila na otoku. Broj vozila na razini cijele županije skaliran je proporcionalno udjelu stanovnika otoka Raba u ukupnom stanovništvu županije.

Tablica 4 Procjena ukupnog broja vozila na otoku Rabu

	Primorsko-goranska županija	Otok Rab
Broj stanovnika	265 419	8 352
Broj vozila	192 336	6 053

Nakon procjene ukupnog broja vozila, provedeno je daljnje skaliranje kako bi se dobila struktura voznog parka prema vrsti pogonskog goriva.

Tablica 5 Broj vozila prema vrsti goriva

	Benzin	Benzin-LPG	Benzin-NG	Diesel	Diesel-LPG	Električna energija	Hibridno vozilo	Hibridno vozilo s vanjskim punjenjem
Županija	89890	4410	120	90855	1	1564	4908	588
Rab	2829	139	4	2859	0	49	154	19

4.3.2. Modeliranje V2G sustava

Jedan od ključnih elemenata naprednih energetske scenarija u ovom radu je integracija sustava "Vehicle to Grid" (V2G). Ovaj sustav podrazumijeva da električna vozila (EV) nisu samo potrošači, već i aktivni sudionici koji mogu pohranjivati energiju i vraćati je u mrežu prema potrebi. Za realistično modeliranje V2G sustava, prvi korak je utvrditi trenutni i procijeniti budući broj električnih vozila na otoku Rabu [15].

Zbog nedostatka preciznih lokalnih podataka o broju registriranih električnih vozila na otoku, za procjenu trenutnog, referentnog stanja korištena je metoda skaliranja. Pristup se temelji na omjeru broja stanovnika i broja električnih vozila na nacionalnoj razini, a zatim se taj omjer primjenjuje na populaciju otoka Raba. Korišteni su službeni podaci o broju stanovnika i procijenjeni broj električnih vozila u Republici Hrvatskoj [16].

Tablica 6 Skaliranje broja električnih automobila za otok Rab

	Hrvatska	Otok Rab
Broj stanovnika	3860000	8352
Broj električnih vozila	10000	22

Prema izračunu, procijenjeni broj električnih vozila na otoku Rabu u referentnom stanju iznosi 22 vozila.

4.4. Definiranje scenarija

Razvoj energetske sustava otoka Raba ispitivan je kroz tri scenarija:

1. LowRES – pratiti istu dinamiku korištenja obnovljivih izvora energije (OIE)
2. RES – povećanje korištenja OIE uzimajući u obzir okolišna ograničenja i zakonski okvir
3. HighRES – modeliranje energetske sustava otoka s 100 % energije iz obnovljivih izvora

S obzirom da otok Rab nema razrađeni SEAP, podaci se uzimaju iz raznih planova Grada Raba i općine Lopar. U tijeku je bio projekt postavljanja fotonaponske elektrane Barbat snage 4,999 MW koja je trebala biti gotova do kraja 2025. godine, no ipak se odustalo od gradnje zbog negativnog utjecaja na strogo zaštićenu vrstu bjelonokta vjetruša (*Falco naumanni*), uslijed gubitka značajne površine njezinog lovnog staništa. Ipak, taj se podatak može iskoristiti za HighRES scenarij s obzirom da već postoji okviran plan projekta.

Tablica 7 Sažeti prikaz scenarija

Scenarij	Broj EV vozila	Godina	Napomena
LowRES	0	2025.	Trenutno stanje, bez poticaja
RES	2119	2030.	Umjereni rast uz subvencije i infrastrukturu (35% svih vozila)
HighRES	6053	2050.	Svi osobni automobili prelaze na EV (100% vozila)

4.4.1. Referentni scenarij „LowRES“

U LowRES scenariju uzima se u obzir samo postojeći, odnosno trenutno instalirani kapacitet fotonaponskih sustava. Prema podacima o broju kućanstava iz popisa 2021. godine, na otoku se nalazi ukupno 3182 kućanstva (2773 u Gradu Rabu i 409 u Loparu). Procjenjuje se da približno 100 kućanstava posjeduje solarne panele. Uz pretpostavku prosječne instalirane snage od 7 kW po kućanstvu, što odgovara modernim sustavima za obiteljske kuće, ukupna instalirana snaga FN sustava na otoku Rabu iznosi 700 kW (0,7 MW). U modelu EnergyPLAN-a, ova snaga je modelirana kao distribuirana, odnosno nasumično raspoređena po otoku, kako bi se simulirala stvarna disperzija malih krovnih elektrana. U ovom scenariju ne predviđa se izgradnja novih vjetroelektrana zbog postojećih zakonskih i okolišnih ograničenja.

Referentni scenarij polazi od pretpostavke da na otoku Rabu još uvijek nema značajnog broja električnih vozila (EV). Stoga se u ovom modelu ne uzima u obzir doprinos električnih vozila ni u potrošnji električne energije ni u pružanju usluga mreži (V2G). Cjelokupna potražnja u sektoru transporta pokriva se isključivo fosilnim gorivima (benzin i dizel).

Ulazni parametri za modeliranje LowRES scenarija u alatu EnergyPLAN sažeti su u tablici ispod.

Tablica 8 Ulazni parametri za LowRES scenarij

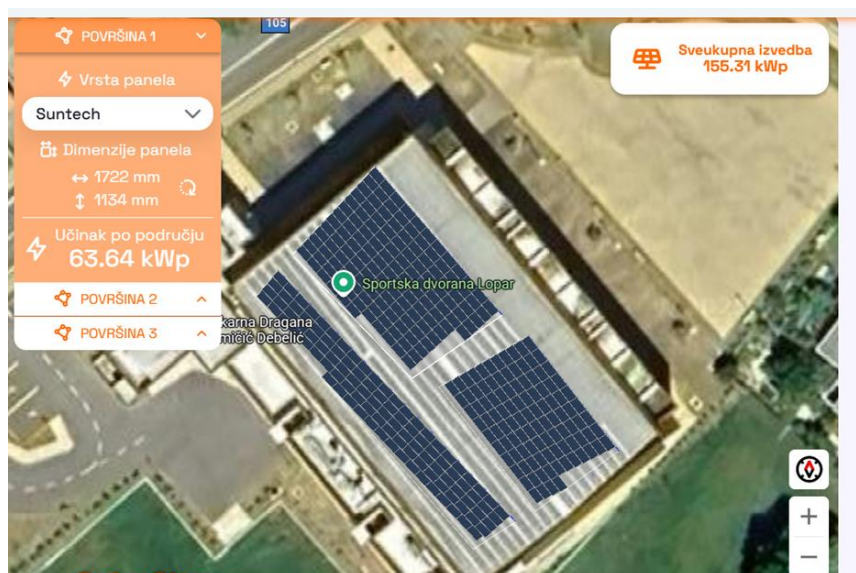
LowRES scenarij	2025.
Ukupna godišnja potrošnja električne energije u GWh/god	58,55
Ukupni instalirani kapacitet PV-a na kućama u kW	700
Broj EV-a na cesti	0

4.4.2. Scenarij umjerenog razvoja „RES“

Za razliku od LowRES scenarija, RES scenarij predviđa ciljano postavljanje fotonaponskih sustava na krovove javnih i poslovnih objekata, uzimajući u obzir njihov raspoloživi potencijal. Ukupna dodatna instalirana snaga FN sustava u ovom scenariju iznosi 424 kW, a dobivena je zbrajanjem potencijala pojedinačnih lokacija u Općini Lopar i Gradu Rabu.

Potencijal za Općinu Lopar identificiran je na sljedećim objektima:

- Sportska dvorana (k.č. 410): 155 kW
- Zgrada škole, vrtića i općine: 30 kW
- Sortirnica u poslovnoj zoni Sorinj: 30 kW
- Stara pošta (k.č. 2278/1): 10 kW



Slika 9 Primjer određivanja potrebnog instaliranog kapaciteta solara putem stranice SolarShop

Za područje Grada Raba, potencijal je izračunat na temelju podataka o zgradama u vlasništvu grada:

- Zgrade u vlasništvu Grada Raba: Prema podacima o ukupnoj površini od 966 m², uz primjenu korekcijskih faktora za raspoloživu krovnu površinu (faktor zauzeća 0,7 i faktor iskoristivosti 0,85) te pretpostavku da je za 1 kW snage potrebno 7 m², procijenjeni potencijal iznosi 41 kW.
- Školski objekti: Ukupno 100 kW.
- Dječji vrtić: Ukupno 58 kW.

Ukupni instalirani kapacitet fotonaponskog sustava u RES scenariju, uključujući i postojećih 700 kW iz LowRES scenarija, te novih kućanstava sa solarima iznosi 2,7 MW.

Druga, ključna komponenta ovog scenarija je uvođenje agrosolarne elektrane snage 10 MW. Za postavljanje ove snage u agrosolarnom sustavu, potrebna je površina od približno 20 do 30 hektara. S obzirom na to da na otoku Rabu postoji procijenjeni potencijal od preko 600 hektara pogodnog poljoprivrednog zemljišta, odabrani kapacitet zauzima manje od 5% ukupnog raspoloživog potencijala. Agrosolarni sustavi pritom omogućuju istovremenu proizvodnju električne energije putem fotonaponskih panela i gospodarsku poljoprivredu na istom zemljištu, čime se optimalno iskorištava prostor i doprinosi održivom razvoju lokalne zajednice. Ovakav pristup povećava energetska neovisnost otoka, smanjuje pritisak na okoliš i podržava sinergiju između energije i poljoprivrede [17].

RES scenarij uvodi značajnu elektrifikaciju osobnog voznog parka. Pretpostavlja se da će do 2030. godine 35% ukupnog broja osobnih automobila na otoku biti električno, što odgovara broju od 2119 električnih vozila (EV). Ova vozila aktivno sudjeluju u energetska sustavu kroz pametno punjenje i V2G tehnologiju, čime pružaju značajnu fleksibilnost mreži za integraciju varijabilnih obnovljivih izvora. Prosječni parametri za EV (kapacitet baterije, snaga punjača) ostaju isti kao u osnovnim pretpostavkama.

Ulazni parametri za modeliranje RES scenarija u alatu EnergyPLAN sažeti su u tablici ispod.

Tablica 9 Ulazni parametri za RES scenarij

RES scenarij	2030.
Ukupna godišnja potrošnja električne energije u GWh/god	58,55
Ukupni instalirani kapacitet PV-a na kućama u kW	2700
Ukupni instalirani kapacitet agrosolara u kW	10000
Postotak osobnih EV-a na cesti	35%
Broj EV-a na cesti	2119
Ukupni kapacitet baterije EV-a u kWh (uzima se baterija od 60 kWh)	127140
Kapacitet punjača za punjenje EV-a u kW (uzima se punjač od 7,4 kW)	15680

4.4.3. Scenarij visoke obnovljivosti „HighRES“

U sklopu HighRES scenarija pretpostavljena je potpuna orijentacija otoka na obnovljive izvore energije do 2050. godine. Kao dio modela uzeta je u obzir planirana, ali neizvedena, fotonaponska elektrana Barbat snage 4,9 MW, čija se godišnja proizvodnja procjenjuje na oko 14,97 GWh. Osim toga, u scenariju je modelirana i izgradnja agrosolarnih sustava ukupne snage 38 MW, s procijenjenom proizvodnjom od približno 53 GWh godišnje. Kombinacijom ovih projekata te manjih instalacija na kućanstvima, otok bi mogao dostići proizvodnju električne energije dostatnu za pokrivanje vlastitih potreba, čime bi se stvorili preduvjeti za potpunu energetska neovisnost.

Pri definiranju scenarija razmatrane su i druge opcije, poput vjetroelektrana, koje bi također mogle pridonijeti diverzifikaciji izvora. Međutim, u ovom slučaju od njih se odustalo zbog prostorno-planskih ograničenja, zakonskih okvira te mogućih negativnih utjecaja na okoliš i turizam. Time se solarna energija, a posebno koncept agrosolara, pokazala kao najprihvatljivije i dugoročno održivo rješenje za Rab.

U analizi HighRES scenarija pretpostavljeno je i da će do 2050. godine sav osobni promet na otoku Rab biti elektrificiran, odnosno da će 100 % vozila na cestama biti električna vozila (EV).

Time se postiže značajno smanjenje emisija u prometnom sektoru, ali i otvara mogućnost

korištenja baterija vozila kao potencijalnih spremnika energije unutar energetskog sustava otoka. Za potrebe modela korišteni su standardni kapaciteti baterija i punjača, u skladu s prethodnim modelima, pri čemu je uzet prosječan kapacitet baterije od 60 kWh te snaga punjača od 7,4 kW. Ovakvim pristupom dobivena je realna procjena ukupnog kapaciteta dostupne pohrane energije, što dodatno doprinosi fleksibilnosti i stabilnosti sustava temeljenog na obnovljivim izvorima energije.

Tablica 10 Ulazni parametri za HighRES scenarij

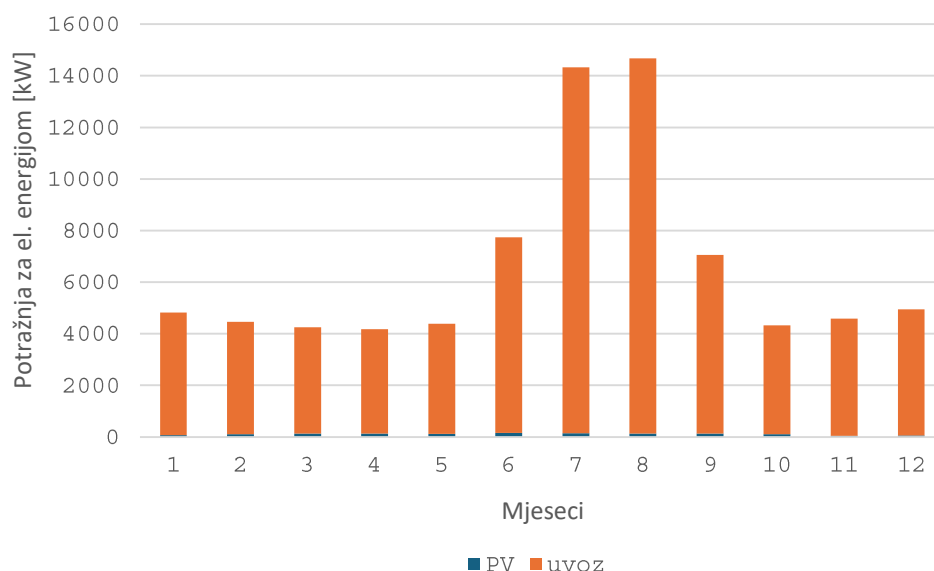
HighRES scenarij	2050.
Ukupna godišnja potrošnja električne energije u GWh/god	58,55
Ukupni instalirani kapacitet PV-a na kućama u kW	5700
Ukupni instalirani kapacitet agrosolara u kW	38000
Ukupni instalirani kapacitet SE Barbat u kW	4900
Postotak osobnih EV-a na cesti	100%
Broj EV-a na cesti	6053
Ukupni kapacitet baterije EV-a u kWh(uzima se baterija od 60 kWh)	363180
Kapacitet punjača za punjenje EV-a u kW(uzima se punjač od 7,4 kW)	44792

5. REZULTATI MODELIRANJA I ANALIZA

U ovom poglavlju prikazani su i analizirani rezultati dobiveni modeliranjem definiranih energetske scenarija u softverskom alatu EnergyPLAN. Analiza započinje referentnim scenarijem (LowRES) koji služi kao temelj za usporedbu, nakon čega slijede rezultati za scenarije umjerenog (RES) i visokog (HighRES) razvoja.

5.1. Analiza referentnog scenarija (LowRES)

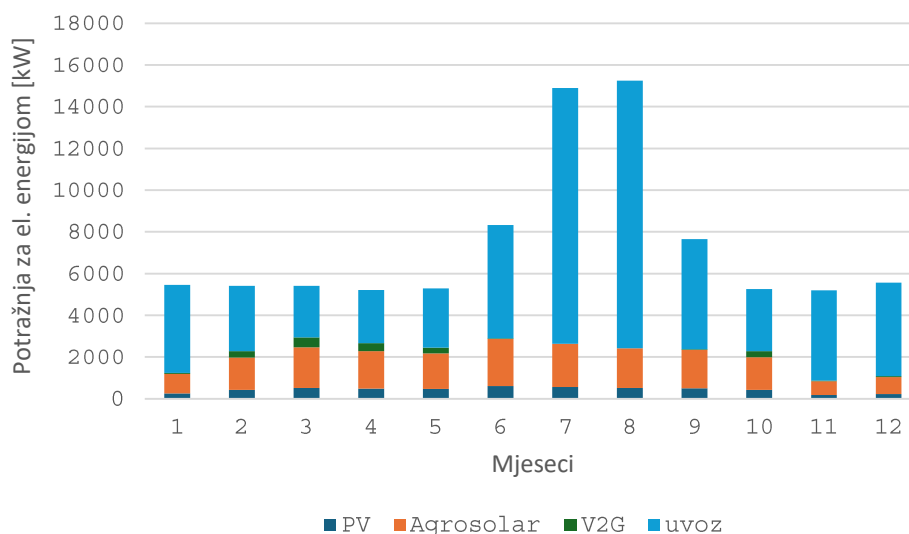
Analiza referentnog scenarija (LowRES) pruža uvid u energetske bilancu otoka Raba ukoliko se nastave trenutni trendovi, bez implementacije značajnijih novih kapaciteta za proizvodnju energije iz obnovljivih izvora ili elektrifikacije transporta. Rezultati modeliranja za ovaj scenarij, prikazani na Slici 10 jasno pokazuju strukturu pokrivanja potražnje za električnom energijom na mjesečnoj razini.



Slika 10 Mjesečno pokrivanje potražnje za električnom energijom [kW] u LowRES scenariju

Ključni zaključak analize LowRES scenarija jest gotovo potpuna ovisnost otoka Raba o uvozu električne energije s kopnene mreže. Od ukupne godišnje potražnje od 58,55 GWh, čak 57,55 GWh (ili 98%) pokriva se uvozom, dok postojećih 700 kW (0,7 MW) fotonaponskih sustava na krovovima kućanstava doprinosi sa svega 1 GWh, što čini manje od 2% ukupne potrošnje. Doprinos lokalne proizvodnje iz fotonaponskih sustava (označen plavom bojom na grafu) marginalan je tijekom cijele godine.

5.2. Analiza scenarija umjerenog razvoja (RES)



Slika 11 Mjesečno pokriće potražnje za električnom energijom [kW] u RES scenariju

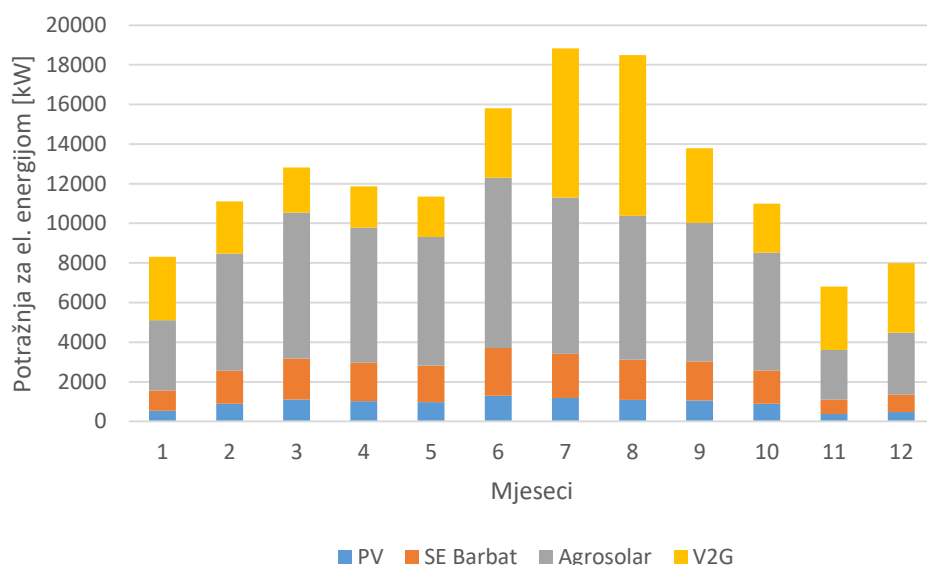
U ovom scenariju, ukupna godišnja proizvodnja iz obnovljivih izvora iznosi 17,73 GWh, što pokriva 27,8% ukupne godišnje potrošnje otoka od 58,55 GWh. Grafikon jasno ilustrira sezonsku dinamiku i ključne izazove ovakvog sustava, koji se temelji isključivo na solarnoj energiji.

Prvi ključni zaključak jest da, unatoč značajnoj instaliranoj snazi, otok i dalje ostaje izrazito ovisan o uvozu električne energije tijekom cijele godine. Paradoksalno, potreba za uvozom je najveća upravo tijekom ljetnih mjeseci. Iako je proizvodnja iz agrosolara tada na svom vrhuncu, vršna potrošnja uzrokovana turističkom sezonom toliko je visoka da je lokalna proizvodnja ni izbliza ne može zadovoljiti. To pokazuje da je za pokrivanje ljetnih vrhova potrošnje potreban znatno veći kapacitet OIE.

Drugi, očekivani izazov vidljiv je tijekom zimskih mjeseci. U tom razdoblju, proizvodnja iz solarnih elektrana je minimalna zbog manjeg broja sunčanih sati i nižeg intenziteta zračenja. Iako je ukupna potrošnja na otoku niža nego ljeti, gotovo cjelokupna potražnja mora se zadovoljiti uvozom energije s kopna.

Ovaj scenarij jasno demonstrira ograničenja sustava koji se oslanja samo na jedan, sezonski ovisan obnovljivi izvor. Iako se postiže značajan udio OIE na godišnjoj razini, sustav je nedovoljan za postizanje energetske neovisnosti i ne može samostalno pokriti ni ljetne ni zimske potrebe otoka.

5.3. Analiza scenarija visoke obnovljivosti (HighRES)

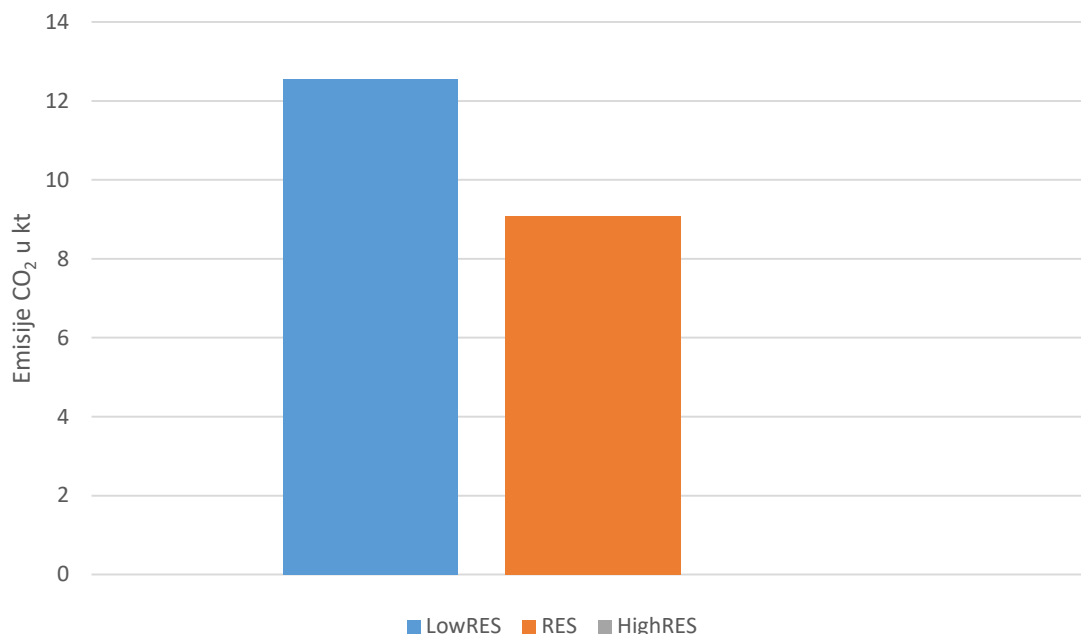


Slika 12 Mjesečno pokriće potražnje za električnom energijom [kW] u HighRES scenariju

Slika 12 prikazuje rezultate za HighRES scenarij, u kojem otok Rab postiže 100% energetske samodostatnost na godišnjoj razini, eliminirajući potrebu za uvozom električne energije. Temelj ovog scenarija je masivna instalacija agrosolarnih elektrana, čija proizvodnja, u kombinaciji s postojećim i potencijalnim fotonaponskim elektranama, daleko premašuje godišnju potrošnju. Grafikon jasno prikazuje kako sinergija predimenzioniranih solarnih kapaciteta i pametnog skladištenja energije omogućuje pokrivanje cjelokupne potražnje tijekom cijele godine.

5.4. Usporedna analiza scenarija

Scenarij "LowRES" predstavlja početno, referentno stanje s djelomičnom integracijom obnovljivih izvora energije. U ovom scenariju, ukupne godišnje emisije iznose 12,6 kt CO₂. Glavni izvori emisija su sektor prometa, koji se uvelike oslanja na vozila s motorima s unutarnjim izgaranjem (dizel i benzin), te sektor grijanja, gdje značajan udio u pripremi potrošne tople vode imaju individualni plinski bojleri.



Slika 13 CO₂ emisije u kt za tri različita scenarija

Tranzicijski scenarij, označen kao "RES", modelira napredniji stupanj energetske tranzicije. Uvođenjem mjera poput povećanja udjela električnih vozila i optimizacije energetske sustava, ukupne godišnje emisije smanjene su na 9,0 kt CO₂. Ovaj scenarij pokazuje značajan napredak, no i dalje zadržava određene izvore emisija, primarno zbog preostalog dijela konvencionalnog voznog parka i korištenja fosilnih goriva u grijanju.

Konačno, scenarij "HighRES" predstavlja viziju potpuno dekarboniziranog energetske sustava s nulnim emisijama CO₂ (0 kt). Ovaj ambiciozni cilj postignut je implementacijom sveobuhvatnih mjera:

1. Potpuna elektrifikacija cestovnog prometa, gdje su sva vozila s unutarnjim izgaranjem zamijenjena električnim vozilima.
2. Dekarbonizacija sektora grijanja, gdje su svi plinski bojleri zamijenjeni rješenjima baziranim na čistoj električnoj energiji, poput visoko učinkovitih dizalica topline.
3. Osiguranje 100% pokrivenosti potražnje za električnom energijom iz lokalnih obnovljivih izvora i sustava za pohranu energije, čime se eliminira potreba za uvozom električne energije s CO₂ otiskom.

Usporedna analiza jasno pokazuje postupan, ali nužan put prema potpunoj dekarbonizaciji. Dok prvi koraci u tranziciji donose značajna smanjenja emisija (smanjenje od 28% prelaskom s "LowRES" na "RES" scenarij), postizanje klimatske neutralnosti zahtijeva potpunu elektrifikaciju sektora krajnje potrošnje, primarno prometa i grijanja, te njihovu integraciju s elektroenergetskim sustavom temeljenim isključivo na obnovljivim izvorima energije.

6. NAČINI POSTIZANJA ENERGETSKE NEOVISNOSTI

Za postizanje energetske neovisnosti otoka Raba potrebno je primijeniti napredne modele koji rješavaju problem nestabilne proizvodnje iz solara. U ovom poglavlju analiziraju se dva koncepta:

- energetske zajednice za lokalno upravljanje energijom i
- zeleni vodik za sezonsko skladištenje,
- uvođenje agrosolarnih sustava u planove razvoja,
- podrška elektromobilnosti i razvoj pripadajuće infrastrukture,
- jačanje elektroenergetske mreže i integracija tehnologija poput Vehicle-to-Grid (V2G).

6.1. Energetske zajednice

Energetske zajednice predstavljaju koncept u kojem građani, lokalne institucije i poduzeća zajednički ulažu u proizvodnju i potrošnju energije, najčešće iz obnovljivih izvora. Njihova glavna prednost ogleda se u mogućnosti dijeljenja proizvedene energije među članovima zajednice, čime se smanjuje ovisnost o centraliziranom sustavu i povećava otpornost lokalne mreže [18].

Na otoku Rabu, značajan potencijal za razvoj energetske zajednice leži u korištenju krovnih površina javnih zgrada (škola, zdravstvenih ustanova, sportskih dvorana) te turističkih objekata i privatnih kućanstava za postavljanje solarnih elektrana. Proizvedena električna energija mogla bi se distribuirati unutar zajednice, dok bi se viškovi vraćali u mrežu ili koristili za druge oblike pohrane.

Na ovaj način:

- smanjili bi se troškovi električne energije za lokalno stanovništvo,
- povećala bi se energetska sigurnost otoka u slučaju poremećaja u prijenosnoj mreži,
- poticala bi se uključenost građana u proces energetske tranzicije.

Implementacija energetske zajednice na Rabu imala bi i dodatnu vrijednost u turističkom kontekstu, jer bi otok mogao biti promoviran kao primjer održive destinacije koja aktivno sudjeluje u smanjenju emisija stakleničkih plinova.

6.2. Zeleni vodik

Zeleni vodik sve se više prepoznaje kao ključna tehnologija u ostvarivanju energetske neovisnosti, posebno u sektorima u kojima je elektrifikacija otežana ili neizvediva. Dobiva se elektrolizom vode uz korištenje električne energije iz obnovljivih izvora, pri čemu ne nastaju emisije ugljičnog dioksida [19].

Za otok Rab, koji raspolaže značajnim potencijalom sunčeve energije, zeleni vodik mogao bi imati višestruku primjenu:

- u prometu, kao gorivo za trajekte i brodove koji povezuju otok s kopnom i okolnim otocima,
- u energetsom sustavu, kao sredstvo za pohranu viškova električne energije proizvedene tijekom ljetnih mjeseci,
- u turizmu i industriji, gdje bi se koristio za napajanje hotelskih kompleksa i lokalnih poduzeća koja žele smanjiti svoj ugljični otisak.

Razvoj infrastrukture za proizvodnju i korištenje zelenog vodika na Rabu mogao bi stvoriti nove mogućnosti zapošljavanja te pozicionirati otok kao predvodnika u energetskej tranziciji na Jadranu. Time bi Rab ne samo osigurao vlastitu energetskeu stabilnost, već i pridonio nacionalnim i europskim ciljevima dekarbonizacije.

6.3. Uvođenje agrosolarnih sustava

Agrosolarni sustavi predstavljaju inovativno rješenje koje omogućuje istovremeno korištenje poljoprivrednog zemljišta za proizvodnju hrane i električne energije. Na otoku Rabu, agrosolari bi mogli smanjiti pritisak na raspoložive površine, istovremeno doprinoseći energetskej neovisnosti i lokalnoj poljoprivredi.

Prednosti agrosolara za Rab uključuju dvostruku korist od zemljišta, zaštitu usjeva (solarni paneli mogu pružiti djelomičnu sjenu), povećanu ekonomsku održivost te lokalnu proizvodnju hrane i energije [20].

Integracijom agrosolarnih projekata u prostorne planove otoka Raba omogućila bi ciljano i strateško iskorištavanje resursa, uzimajući u obzir specifičnosti mediteranske klime i poljoprivrednih kultura.

6.4. Podrška elektromobilnosti

Razvoj elektromobilnosti na otocima dosta je važan s obzirom da su to turistički popularne destinacije sa puno prometa tijekom sezone. Poticanje korištenja električnih vozila može

poboljšati kvalitetu zraka, smanjiti buku i promovirati otok Rab kao ekološki osviještenu destinaciju.

Mjere koje se mogu provesti uključuju:

- postavljanje više punionica za električne aute i bicikle na glavnim lokacijama kao što su turistička mjesta, središta grada, trajektna pristaništa i parkirališta. Trenutno ih nema puno pa bi svaka nova punionica znatno olakšala život lokalnom stanovništvu i turistima.
- novčani poticaju za kupnje električnih automobila
- popularizacija električnih bicikala i skutera – sve više turista uzima ovu opciju kao optimalno rješenje za razgledavanje mjesta

6.5. Jačanje elektroenergetske mreže i V2G tehnologija

S obzirom na sve veći udio obnovljivih izvora energije, poput solara, u energetsom miksu otoka Raba, ključno je osigurati stabilnost i pouzdanost elektroenergetske mreže. Postojeća mreža mora biti sposobna prihvatiti fluktuacije u proizvodnji i distribuciji električne energije, kao i integrirati nove tehnologije poput Vehicle-to-Grid (V2G).

Mjere jačanja mreže i implementacije V2G-a obuhvaćale bi:

- Ulaganje u pametne mreže (smart grids) koje omogućuju bolji nadzor, upravljanje i optimizaciju toka energije.
- Nadogradnja transformatorskih stanica i prijenosnih linija kako bi se osigurala dovoljna propusnost za integraciju novih izvora i potrošača.
- Korištenje električnih vozila kao pokretnih baterija koje mogu vraćati višak električne energije u mrežu u trenucima povećane potražnje ili smanjene proizvodnje iz obnovljivih izvora. To omogućuje veću fleksibilnost mreže i smanjuje potrebu za skupim ulaganjima u stacionarne baterijske sustave.
- Razvoj modela koji bi potaknuli vlasnike električnih vozila na sudjelovanje u V2G programima, primjerice kroz naknade za pružanje usluga stabilizacije mreže.

7. ZAKLJUČAK

Zaključno, ovaj rad je detaljno analizirao potencijale i izazove energetske tranzicije otoka Raba kroz tri zasebna scenarija – referentni (LowRES), umjereni (RES) i ambiciozni (HighRES). Korištenjem metodologije RenewIslands i modeliranjem u softverskom alatu EnergyPLAN, jasno je pokazano da otok ima značajne resurse, prvenstveno u obliku solarne energije i agrosolarnih sustava, koji uz potpunu elektrifikaciju transporta i primjenu Vehicle-to-Grid tehnologije mogu omogućiti ostvarenje energetske neovisnosti.

Poseban izazov u radu predstavlja sezonalnost potrošnje vezana uz turističku aktivnost, što zahtijeva dinamičan i fleksibilan sustav koji može učinkovito balansirati proizvodnju i potrošnju energije tijekom cijele godine. Upravo integracija električnih vozila kao pokretnih baterija i razvoj energetske zajednice predstavljaju ključne mehanizme za postizanje stabilnosti i otpornosti mreže unatoč ovim varijacijama.

Rad potvrđuje kako je tehnička izvedivost potpune dekarbonizacije otoka realna, no za realizaciju su nužne koordinirane investicije i strateško planiranje, uz uključenost lokalne zajednice i donošenje poticajnih politika. U konačnici, rezultati mogu poslužiti kao primjer i smjernica za druge otočne zajednice sa sličnim specifičnostima, pridonoseći ciljevima održivog razvoja i klimatske neutralnosti.

LITERATURA

- [1] Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja RH. "Nacionalni energetske i klimatski plan do 2030."
- [2] Sturmberg, B.C.P. et al. (2024): "Vehicle-to-grid response to a frequency contingency in a national grid", *Nature Communications Engineering*, 3, Article number: 10. <https://doi.org/10.1038/s44333-024-00010-8>
- [3] Eurostat. "Renewable energy statistics," <ec.europa.eu/eurostat>.
- [4] Dorotić, H., Doračić, B., Dobravec, V., Pukšec, T., Krajačić, G., Duić, N. (2019): "Integration of transport and energy sectors in island communities with 100% intermittent renewable energy sources", *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 99, 109–124. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.033>
- [5] Duić, N., Krajačić, G., & da Graça Carvalho, M. (2008). RenewIslands methodology for sustainable energy and resource planning for islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(4), 1032–1062. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.015>
- [6] Aalborg University. EnergyPLAN documentation, www.energyplan.eu
- [7] Grad Rab. "Strategija razvoja Grada Raba," www.rab.hr.
- [8] Hrvatske električne mreže (HEP). "Izješće o proizvodnji električne energije." www.hep.hr.
- [9] Uredba o uređenju i zaštiti zaštićenog obalnog područja mora (NN 128/2004).
- [10] Natura 2000. "Ekološka mreža Hrvatske," www.natura2000.hr.
- [11] Udruga stanara. (n.d.). Vrelo, otok Rab. <https://www.udruga-stanara.hr/upload/pdf/Vrelo-otok-Rab.pdf>
- [12] Entsoe. "Statistical Data for Croatia: Electricity Consumption," www.entsoe.eu.
- [13] Renewables.ninja. "Solar and wind generation data," <https://www.renewables.ninja>.
- [14] Hrvatski autoklub. "Vrste vozila po županijama i vrstama goriva za 2024." www.hak.hr.
- [15] Šare, A., Krajačić, G., Pukšec, T., & Duić, N. (2015). The integration of renewable energy sources and electric vehicles into the power system of the Dubrovnik region. *Energy, Sustainability and Society*, 5, Article number: 27. <https://doi.org/10.1186/s13705-015-0055-7>
- [16] Državni zavod za statistiku (2022). Popis stanovništva, kućanstava i stanova 2021. konačni rezultati. Preuzeto s <https://dzs.gov.hr/vijesti/objavljeni-konacni-rezultati-popisa-2021/1270>

- [17] OIE (2023). Study on the Potential of Solar Energy Use in Croatia. Obnovljivi izvori energije. Preuzeto s <https://oie.hr/wp-content/uploads/2023/09/ENG-Studija-o-potencijalu-uporabe-solarne-energije-FINAL-06092023.pdf>
- [18] M. Gržanić, D. Jurković, J. Piljan, "Energy Sharing in Croatia - Recommendations on Encouraging Citizens Involvement in Energy Community and Collective Self-Consumption", SSRN, 2023. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4408723>
- [19] J. Šimunović, K. Raos, E. Guštin, "Techno-economic assessment of hydrogen refueling station for green hydrogen in Croatia", International Journal of Hydrogen Energy, 47(8), 2022, 3796-3808. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.233>
- [20] D. Matulić, "Agrivoltaics and Aquavoltaics: Potential of Solar Energy Use in Agriculture and Freshwater Aquaculture in Croatia", Faculty of Agriculture, University of Zagreb, 2023. <https://repozitorij.agr.unizg.hr/islandora/object/agr:4078>