

Sveučilište u Zagrebu

Geodetski fakultet

Luka Družević, Karlo Zaplatić, Dino Žigulić

Razvoj metodologije za određivanje optimalne lokacije za izgradnju vjetroelektrana

Zagreb, 2022.

Ovaj rad izrađen je na Geodetskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, Zavodu za kartografiju i fotogrametriju, Katedri za fotogrametriju i daljinska istraživanja, pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Matea Gašparovića i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2021./2022.

Popis i objašnjenje kratica korištenih u istraživanju

AHP	Analitički hijerarhijski proces (engl. Analytic Hierarchy Process)
DGU	Državna geodetska uprava (engl. State Geodetic Directorate)
DEM	Digitalni model reljefa (engl. Digital Elevation Model)
DOF	Digitalni ortofoto (engl. Digital Orthophoto)
TK25	Topografska karta 1:25 000
HOK	Hrvatska osnovna karta
HTRS96/TM	Novi projekcijski koordinatni referentni sustav Republike Hrvatske 1996 poprečne Mercatorove projekcije (engl. Croatian Terrestrial Reference System 1996 of Transverse Mercator projection)
QGIS	Geografski informacijski sustav (engl. Quantum GIS)
WFS	Mrežni servis za vektorske podatke (engl. Web Feature Service)
WMS	Mrežni kartografski servis (engl. Web Map Service)
HOPS	Hrvatski operator prijenosnog sustava
NIPP	Nacionalna infrastruktura prostornih podataka
TOPSIS	TOPSIS metoda (engl. Technique for Order Preference by similarity to ideal solution)

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA	4
1.2. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA	8
2. OPĆI I SPECIFIČNI CILJEVI RADA	11
3. POSTOJEĆE STANJE VJETROELEKTRANA U HRVATSKOJ	12
3.1. LOKACIJE VJETROELEKTRANA	12
3.2. GODIŠNJA PROIZVODNJA ENERGIJE.....	13
4. MATERIJALI I METODE	14
4.1. PRONALAŽENJE RASTERSKIH PODATAKA	14
4.2. PRONALAŽENJE VEKTORSKIH PODATAKA	15
4.3. KORIŠTENI SOFTVERI	17
4.4. MULTIKRITERIJSKA GIS ANALIZA	19
4.4.1. KRITERIJI I PODKRITERIJI ISTRAŽIVANJA	20
4.4.1.1 EKONOMSKI KRITERIJI	20
4.4.1.2 EKOLOŠKI KRITERIJ.....	22
4.4.1.3 DRUŠTVENI KRITERIJ	23
4.4.2. PROCES ANALITIČKE HIJERARHIJE (AHP)	23
5. IZRADA ANALIZE	29
5.1. EKONOMSKI KRITERIJI	30
5.2. EKOLOŠKI KRITERIJI	36
5.3. DRUŠTVENI KRITERIJI.....	40

6. REZULTATI	44
6.1. PRIKAZI NADKRITERIJA	44
6.2. PRIKAZ POGODNOSTI ZA IZGRADNJU VJETROELEKTRANA	48
6.3. ODABIR NAJBOLJE LOKACIJE ZA IZGRADNJU VJETROELEKTRANA.....	51
6.4. USPOREDBA DOBIVENIH REZULTATA S POSTOJEĆIM VJETROELEKTRANAMA.....	53
7. RASPRAVA.....	55
8. ZAKLJUČAK.....	57
ZAHVALA.....	59
POPIS LITERATURE.....	60
MREŽNE ADRESE	61
POPIS SLIKA.....	63
POPIS TABLICA.....	66
SAŽETAK.....	67
ABSTRACT	68

1. UVOD

U današnje vrijeme energija je postala jedan od najvažnijih elemenata u društvenom i gospodarskom razvoju neke države. Električna energija i njena proizvodnja igraju ključnu ulogu u modernim društvima, te je potreba za tim oblikom energije usko povezana sa stupnjem razvijenosti svake države. Najčešće korišteni izvori energije su ugljen, naftni derivati, prirodni plin i nuklearno gorivo (Konstantinos i dr., 2019).

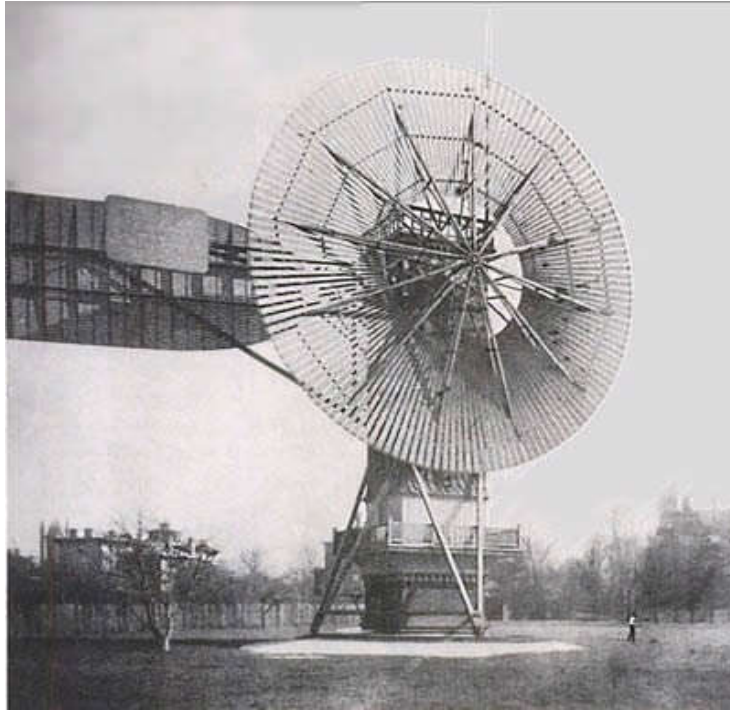
Fosilna goriva zauzimaju najveći udio u energentima koji pokreću svjetsku proizvodnju. Zbog činjenice da su njihove globalne rezerve ograničene i neravnomjerno raspoređene, postoji mogućnost da bi u skoroj budućnosti moglo doći do daljnjeg porasta njihovih cijena. Korištenje fosilnih goriva podrazumijeva troškove eksploatacije, transporta, prerade sirovine u iskoristiv proizvod i distribucija do krajnjeg korisnika.

Osim toga, problem s kojim se danas suočavamo je efekt globalnog zatopljenja. Globalno zatopljenje je rezultat izgaranja fosilnih goriva kroz dugi niz godina što je dovelo do porasta stakleničkih plinova u atmosferi i porasta srednje temperature planeta. Štetne pojave za okoliš izražene su i mnoge države traže izlaz u zelenoj tranziciji, odnosno postepenom napuštanju dosadašnjih izvora energije. Kako bi zadržali energetske sigurnost, velik broj država razvio je nove energetske politike u kojima se okreću prema korištenju obnovljivih izvora energije. Obnovljivi izvori energije (energija vodotoka, energija vjetra, sunčeva energija, geotermalna energija, biodizel, bioplin, itd.) dostupni su u prirodi te su obnovljivi u cijelosti ili djelomično. U zadnjih nekoliko godina korištenje obnovljivih izvora energije značajno raste te se pretpostavlja da će u budućnosti zasigurno imati veliku ulogu u energetskej opskrbi (Horvat, 2019).

Kako bi se postigli zadani ciljevi vezani za što veću implementaciju obnovljivih izvora u svakodnevni život nastoji se, između ostalog, sve više akumulirati energija vjetra jer je ona jedna od ekološki najprihvatljivijih izvora energije. Uz to, ona je najbrže rastući i najekonomičniji obnovljivi izvor energije. Međutim, energija vjetra ima i neke ograničavajuće čimbenike. Jedan od njih je i taj da prostori s najvećom brzinom vjetra nisu uvijek pogodni za izgradnju vjetroelektrana. Osim toga sama lokacija vjetroelektrane može se negativno odraziti na ljude i okoliš, ali i dovesti u pitanje ekonomsku isplativost projekta (Horvat, 2019).

Zbog činjenice da je vjetar obnovljiv, izdašan i lako dostupan izvor energije, njegova uporaba danas ima najveću stopu rasta. Ljudi su kroz povijest koristili energiju vjetra kako bi si olakšali svakodnevni život pa su tako pomoću vjetrenjača crpili vodu i mljeli žito. Osim toga, dugi niz godina, vjetar je imao važnu ulogu u vodenom transportu jer je pokretao jedrenjake. Kako se tehnologija razvijala tako se i energija vjetra akumulirala na različite načine.

Jedan od prvih izgrađenih vjetroagregata bio je razvijen u Clevelandu od strane tvrtke Charlesa F. Brusha. Promjer rotora vjetroagregata bio je 17 metara te je postavljen na stup visine 18 metara. Imao je 144 lopatice te mu je svrha bila pokretanje strojeva i žarulja te punjenje akumulatora (Slika 1). Razvoj turbina i sam napredak tehnologije omogućio je puno veću efikasnost današnjih vjetroagregata pa samim time i veću akumulaciju energije (Slika 2) (Štefulj, 2015).



Slika 1. *Vjetroagregat Charlesa F. Brusha (Štefulj, 2015)*



Slika 2. *Moderni vjetroagregat (Štefulj, 2015)*

1.1. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Problem pronalaska optimalne lokacije analiziran je u više radova s obzirom da lokacija prvenstveno utječe na isplativost cijele investicije. U tablici 1. dani su kriteriji koji su korišteni u tri rada koji se bave pronalaskom optimalne lokacije za izgradnju vjetroelektrane na području Nigerije (Ayodele i dr., 2018), Pakistana (Ali i dr., 2017) i Grčke (Konstantinos i dr., 2019)

U radu koji se odnosi na područje Nigerije korištena je AHP (engl. Analytic hierarchy method) metoda za pomoć u multikriterijskom donošenju odluka te su kao nadkriteriji korišteni ekonomski i okolišno-socijalni. Analizirani podkriteriji ekološkog nadkriterija bili su brzina vjetra, nagib, udaljenost od elektroenergetske mreže te udaljenost od cesta. Okolišno-socijalni nadkriterij obuhvaća pokrov zemljišta, zaštićena područja, rijeke i vodena tijela, zračne luke, naseljeno područje i područja nastanjena pticama. Za svaki podkriterij vrijednosti su klasificirane u pet klasa, od nepogodnog do iznimno pogodnog. Kao isključivi kriteriji navedeni su aerodromi sa radijusom od 5000 m, područja naseljena pticama sa radijusom od 300 m, zaštićena područja sa radijusom od 500 m, rijeke i vodena tijela sa radijusom od 200 m te zemljišni pokrov klasificiran kao šuma i močvarno područje.

Područje Grčke, odnosno regije Trakija i Istočna Makedonija, analizirano je koristeći parametre poput brzine vjetra, nagiba, pokrova zemljišta, udaljenosti od elektroenergetske mreže i udaljenost od cesta. Kod ovih parametara korištena je AHP metoda dok je za pomoć pri multikriterijskom odlučivanju kod analiziranja udaljenosti od naselja, buke od vjetroturbina i vizualne izloženosti korištena TOPSIS metoda (engl. Technique for Order Preference by similarity to ideal solution). Kod TOPSIS metode optimalna varijanta iz skupa varijanti je ona koja predstavlja najkraću geometrijsku udaljenost od idealne varijante. Isključivi kriteriji koji su korišteni u ovome radu su: zaštićena područja, područja udaljena više od 15000 m od

cestovne mreže, arheološka nalazišta te povijesne i kulturne znamenitosti sa radijusom od 3000 m te koridori željeznica, dalekovoda, elektrana i zone naselja.

Područje Pakistana analiziralo se također u svrhu pronalaska optimalne lokacije za postavu vjetroelektrana temeljem AHP metode odlučivanja. Kao nadkriteriji korišteni su brzina vjetra, gustoća vjetra, faktor kapaciteta, troškovi transporta, udaljenost od elektroenergetske mreže i gustoća naseljenosti.

Uočljivo je kako su izvršene klasifikacije svakog podkriterija i nadkriterija na različite načine ovisno o stupnju pogodnosti. Nepogodnim kriterijima, odnosno onim parametrima koji zadovoljavaju isključivi kriterij, dodijeljena je vrijednost 0, dok su ostale vrijednosti rangirane u rasponu od slabo pogodnih do iznimno pogodnih dodjeljivanjem cjelobrojnih vrijednosti određenog raspona. Broj stupnjeva pogodnosti razlikuje se među analiziranim radovima, ali i među analiziranim parametrima pojedinog rada. Dodjeljivanjem cjelobrojnih vrijednosti za svaki stupanj pogodnosti ubrzava se i pojednostavljuje postupak analize, ali je primjetno gubljenje dijela podataka s obzirom da se podaci svrstavaju u klase, odnosno provodi se izvjesna doza generalizacije. Prema Gašparović I. i dr. (2019), ovaj problem može se riješiti normaliziranjem vrijednosti rastera za parametar kojeg taj raster predstavlja. Pikselima se dodijele vrijednosti s obzirom na udaljenost od određenog objekta tako da oni pikseli bliže objektu poprimaju vrijednost 1 te se vrijednosti smanjuju do 0 udaljavanjem od objekta ili obrnuto, ukoliko se želi naglasiti suprotan odnos pogodnosti.

Tablica 1. Kriteriji korišteni u analiziranim radovima

Kriteriji	<i>Nigerija</i>	<i>Pakistan</i>	<i>Grčka</i>
Brzina vjetra	NEP: <4,4 m/s POG: 4 klase [m/s]: 4.4-5.1, 5.1-6.0, 6.0-7.0, >7.0	korišten, ali nepoznat	POG: 5 klasa [m/s]:0-2.5, 2.5-5.0, 5.0-7.5, 7.5-10.0, 10.0-12.5
Gustoća vjetra	nije korišten	korišten, ali nepoznat	nije korišten
Nagib	NEP: >15 % POG: 4 klase [%]: <3, 3-6, 6-10, 10-15		NEP: >20% POG: 2 klase [%]: 0-10, 10-20
Udaljenost od elektroenergetske mreže	NEP: do 250 m POG: 4 klase [m]: 250-5000, 5000-10000, 10000-20000, >20000	korišten, ali nepoznat	NEP: do 1.5 d POG: 3 klase [m]: 1.5 d-5000, 5000-10000, 10000- d- promjer turbine vjetroelektrane (cca. 1.5x85 m=127.5 m)
Udaljenost od prometnica	NEP: <500 m POG: 4 klase [m]: 500-5000, 5000-10000, 10000-15000, 15000-20000	nije korišten	NEP: do 1.5 d POG: 5 klasa [m]: 1.5 d -100, 100-200, 200-500, 500-1000, 1000-15000
Udaljenost od naselja	NEP: do 2000 m POG: 4 klase [m]: 2000-6000, 6000-10000, 10000-20000, >20000	nije korišten	NEP: do 500 m (samostani i ostala naselja), do 1000 m (gradovi), do 1500 m (tradicionalna naselja), optimalan raspon 5-10 km

Trošak prijevoza	nije korišten	korišten, ali nepoznat	nije korišten
NEPOGODNA PODRUČJA (uz prethodno navedena)			
Aerodromi	NEP: do 5000 m	nije korišten	NEP: do 1.5 d
Radari	nije korišten	nije korišten	NEP: do 1.5 d
Pokrov zemljišta	NEP: močvare, šume	nije korišten	
Zaštićena područja	NEP: do 500 m	nije korišten	unutar zaštićenih područja nije dozvoljena gradnja, osim uz posebnu suglasnost
Arheološka nalazišta, povijesne znamenitosti, kulturne znamenitosti	NEP: do 500 m	nije korišten	NEP: do 3000 m* *nije bilo potrebe za korištenjem
Vodene površine	NEP: do 200 m	nije korišten	
Područja proizvodnih aktivnosti (obrađeno poljoprivredno zemljište, područja za držanje stoke, kamenolomi, ribogojilišta, turističke lokacije)	nije korišten	nije korišten	NEP: do 1.5 d, do 500 m (kamenolomi), do 1000 m (turističke lokacije)
Gustoća naseljenosti	nije korišten	korišten, ali nepoznat	nije korišten
Stvaranje buke	nije korišten	nije korišten	NEP: do 200 m POG: 2 klase [m]: 200-400, > 400

Vidljivost	nije korišten	nije korišten	za visinu vjetroelektrane uzeta je vrijednost od 100 m, a azimut 360°
Područja nastanjena pticama	NEP: do 300 m	nije korišten	nije korišten
Faktor kapaciteta	nije korišten	korišten, ali nepoznat	nije korišten

Napomena: oznakom „NEP“ označeni su isključivi kriteriji, a znakom „POG“ kriteriji koji se vrednuju ovisno o stupnju pogodnosti.

1.2. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

Kao područje istraživanja za odabir najpovoljnijih lokacija za izgradnju vjetroelektrana odabrane su Ličko-senjska, Zadarska i Šibensko-kninska županija. Navedene županije nalaze se na priobalnom području Republike Hrvatske te pokrivaju 21% ukupnog teritorija države. Zbog velikog potencijala energije vjetra na tom području, koji je djelomično iskorišten, provesti će se znanstveno istraživanje kako bi se odredile potencijalne lokacije na kojima još nisu izgrađene vjetroelektrane. Do sada je na području ove 3 županije izgrađeno 16 vjetroelektrana ukupne instalirane snage 653 MWh. Popis izgrađenih vjetroelektrana dan je u tablici 2.

Tablica 2. Popis izgrađenih vjetroelektrana na predmetnom području (URL 1)

Vjetroelektrana	Instalirana snaga (MW)	Županija	Godišnja proizvodnja (GWh)	Puštena u rad
VE Korlat	58	Zadarska županija	170	28. travnja 2021.
VE Poštak	44,2	Zadarska županija	100	listopad 2017.
VE Zelengrad	42	Zadarska županija	110	3. lipnja 2015.
VE Bruška	36,8	Zadarska županija	122	14. veljače 2012.
VE Jasenice	11,5	Zadarska županija	44	18. siječnja 2020.
VE Velika Popina	9,2	Zadarska županija	26	31. prosinca 2010.
VE Zadar 4	9,2	Zadarska županija	30	2013.
VE Ravne 1	5,95	Zadarska županija	15	19. kolovoza 2004.

VE Krš- Pađene	142	Šibensko- kninska županija	480 (predviđeno)	2021.
VE Danilo	43,7	Šibensko- kninska županija	100	7. lipnja 2014.
VE Glunča	20,7	Šibensko- kninska županija	53	2016.
VE Trtar- Krtolin	11,2	Šibensko- kninska županija	28	lipanj 2006.
VE Crno brdo	10,5	Šibensko- kninska županija	27	24. kolovoza 2011.
VE Orlice	9,6	Šibensko- kninska županija	25	prosinac 2009.
VE Senj	156	Ličko-senjska županija	530 (predviđeno)	2021.
VE Vrataruša	42	Ličko-senjska županija	125	15. prosinca 2010.

2. OPĆI I SPECIFIČNI CILJEVI RADA

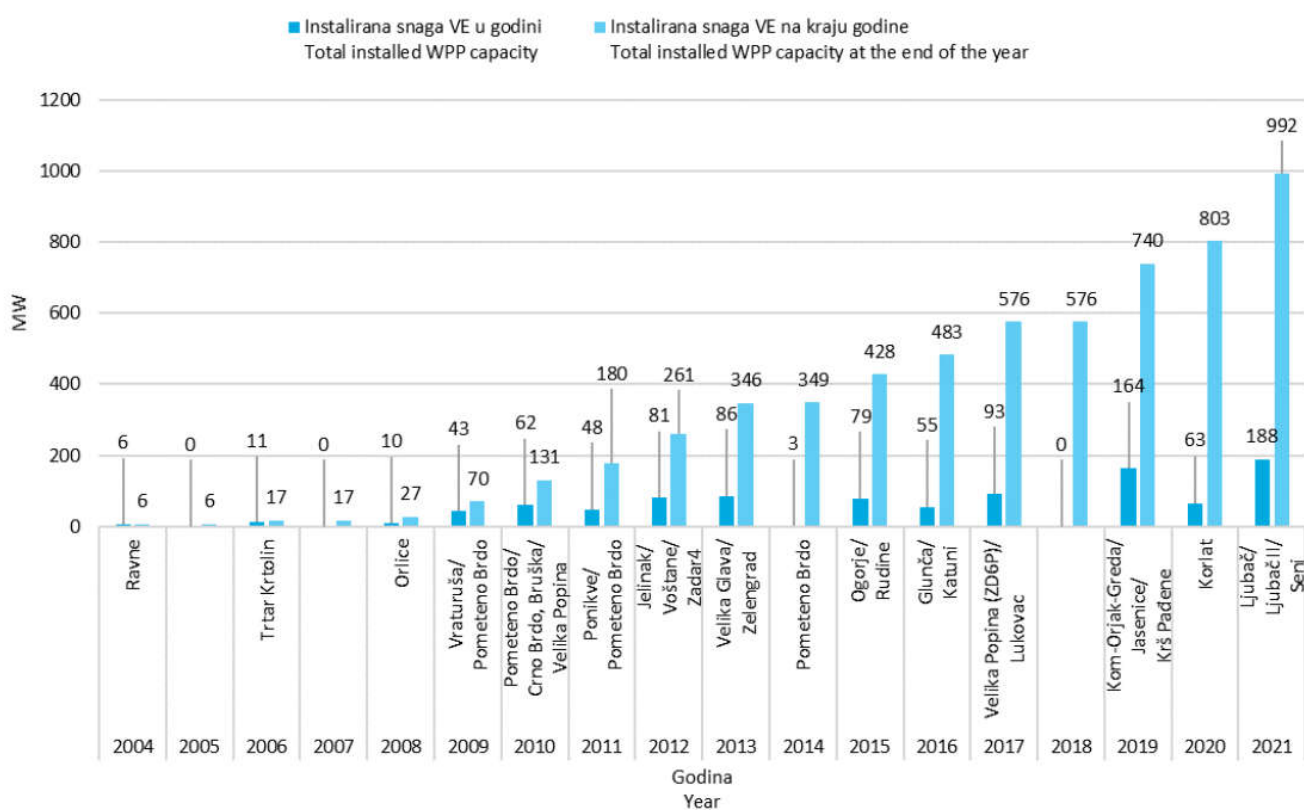
Globalno zatopljenje i nedostatak energenata s kojim se svakodnevno susrećemo postale su jedne od najbitnijih tema današnjice. Kako bi se zaustavio efekt globalnog zatopljenja, koji najvećim dijelom napreduje zbog izgaranja fosilnih goriva, potrebno je u što većoj mjeri razvijati obnovljive izvore energije. Razvojem obnovljivih izvora energije posljedično će se povećati količina energenata na tržištu potrebna za normalno funkcioniranje društva, što dovodi do veće sigurnosti u opskrbi i kretanju cijena, a s druge strane smanjit će se negativni utjecaji na okoliš kojeg generiraju fosilna goriva.

Europska unija prepoznala je njihovu važnost u postizanju energetske neovisnosti i sigurnosti, ali i smanjenju socijalnog jaza te ulaže znatne napore da bi bila vodeća sila u njihovom razvoju i primjeni. Takvim smjerom energetske politike obnovljivi izvori energije, pa tako i energija vjetra, postali su ključni u razvoju energetike te više nema govora hoće li oni biti nešto što će uspjeti ili ne, nego je to samo pitanje u kojem smjeru i kojim intenzitetom će se razvijati (Biloš, 2020).

Cilj znanstvenog istraživanja je pomoću određenih algoritama provesti analizu za predmetno područje kako bi se s obzirom na niz zadanih kriterija odredile potencijalne lokacije za izgradnju vjetroelektrane. Uz prethodno navedeno, također će se usporediti lokacije već izgrađenih vjetroelektrana s provedenom analizom kako bi se moglo provjeriti jesu li postavljene kriteriji ispravno zadani.

3. POSTOJEĆE STANJE VJETROELEKTRANA U HRVATSKOJ

Vjetroelektrane, kao jedan od oblika iskorištavanja obnovljivih izvora energije, svoje su mjesto pronašle i u Republici Hrvatskoj. Prva vjetroelektrana izgrađena je 2004. godine sa 5,95 MW instalirane snage (Vjetroelektrana Ravne) i od tada se bilježi rast godišnjeg puštanja u pogon novih instaliranih kapaciteta vjetroelektrana. Na slici 3 prikazana je vremenska dinamika izgradnje vjetroelektrana u Republici Hrvatskoj.

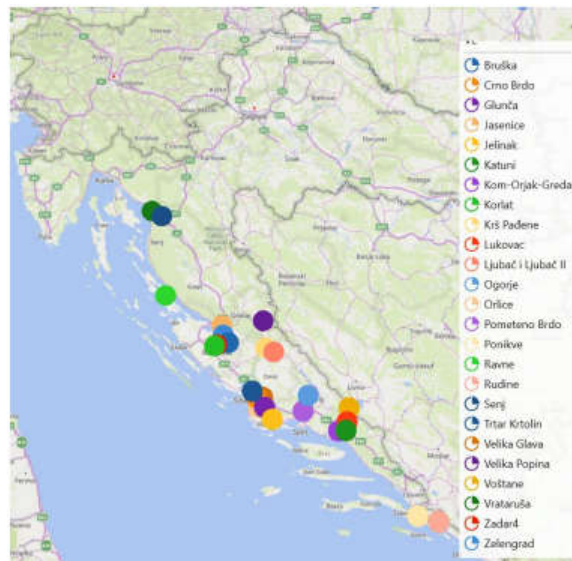


Slika 3. Vremenska dinamika izgradnje vjetroelektrana u Republici Hrvatskoj (URL 2)

3.1. LOKACIJE VJETROELEKTRANA

Od 23 vjetroelektrane u pogonu i 3 u probnom radu, koliko ih je izgrađeno na području Republike Hrvatske sve su smještene u njenom priobalnom dijelu (URL 2). Najveći broj vjetroelektrana lociran je u Šibensko-kninskoj županiji iza koje slijede Zadarska, Splitsko-

dalmatinska i Ličko-senjska županija. Istarska županija jedina je priobalna županija bez izgrađene vjetroelektrane. Također, bitno je istaknuti kako su vjetroelektrane u Republici Hrvatskoj geografski relativno slabo raspršene (Slika 4), a to se ogleda u činjenici da najveća udaljenost između 2 vjetroelektrane iznosi 300 km što uz izraženu promjenjivost brzine i smjera vjetra značajno utječe na promjenjivost ukupne proizvodnje vjetroelektrana, a samim time i na vođenje elektroenergetskog sustava u cjelini.



Slika 4. Lokacije postojećih vjetroelektrana (URL 2)

3.2. GODIŠNJA PROIZVODNJA ENERGIJE

U Godišnjem izvještaju o proizvodnji vjetroelektrana u Hrvatskoj kojeg objavljuje HOPS d.o.o. (Hrvatski operator prijenosnog sustava) navodi se kako je u 2021. godini u redovnom pogonu bilo 23 vjetroelektrana, s ukupno instaliranom snagom od 801,75 MW i odobrenom snagom priključenja u iznosu od 794,95 MW dok je u probnom pogonu/izgradnji još 3 vjetroelektrane, ukupne instalirane snage od 188,4 MW, a ukupno odobrene priključne snage 185,9 MW.

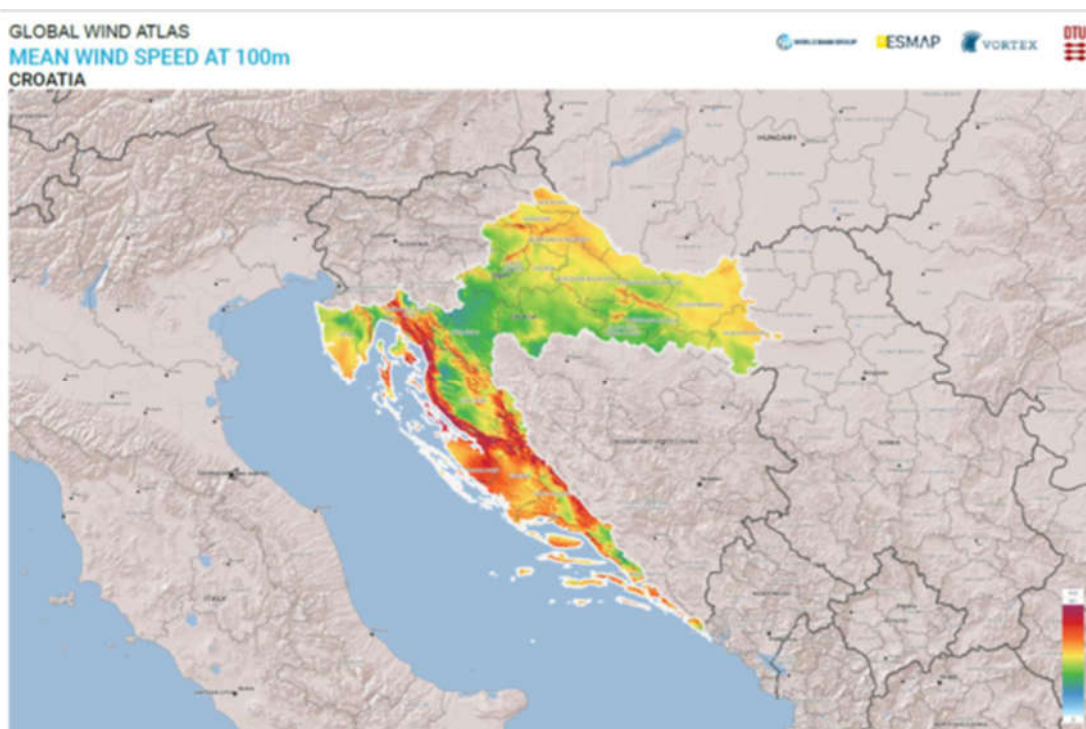
Prema Godišnjem izvješću za 2020. godinu HOPS-a vjetroelektrane pokrile su 14% potreba Republike Hrvatske za električnom energijom.

4. MATERIJALI I METODE

4.1. PRONALAZENJE RASTERSKIH PODATAKA

Za dobivanje preciznog i točnog krajnjeg proizvoda, potreban je pronalazak ažurnih i pouzdanih podataka, kako vektorskih tako i rasterskih, koji služe kao podloga za GIS analize. Naglasak je stavljen na otvorene, „open source“ podatke.

Najbitniji rasterski podaci su oni o brzini vjetra i gustoći snage vjetra za teritorij Republike Hrvatske. Takvi podaci preuzeti su sa web stranice „Global Wind Atlas“ u GeoTiff formatu (Slika 5), gdje se nalaze brzine vjetra na 10 m, 50 m, 100 m, 150 m i 200 m nadmorske visine te je prostorna rezolucija rastera 200 m (URL 3).



Slika 5. Sučelje portala "Global Wind Atlas"

Tablica 3. "Key- value"

Key	Value
highway	*
railway	*
aeroway	aerodrome

Nakon filtriranja podataka, funkcijom export preuzimaju se podaci, u GeoJSON formatu.

Također, podaci o elektroenergetskoj mreži preuzeti su putem WFS servisa (engl. Web Feature Service) sa web stranice NIPP-a (Nacionalna infrastruktura prostornih podataka). Digitalna karta HOPS-a skupni je grafički prikaz postojećeg stanja visokonaponske mreže (nazivnog napona 110 kV i više) iz terenskih izmjera (geodetskih elaborata, izvedbenih projekata i geotehničkih izmjera) na podlogama Topografske karte 1:25 000 (TK25), Hrvatske osnovne karte (HOK), a koji sadrže podatke o ogradama visokonaponskih postrojenja i trasama visokonaponskih dalekovoda i kabela u vlasništvu Hrvatskog operatora prijenosnog sustava d.o.o (URL 8).

Podaci o pokrovu i namjeni korištenja zemljišta preuzeti su putem WFS servisa dostupnog unutar NIPP-a (URL 9). CORINE Land Cover je na razini Europske unije prihvaćena kao temeljni set podataka o stanju, namjeni i promjenama zemljišnog pokrova.

Podaci o naseljima preuzeti su putem WFS servisa dostupnog na stranici NIPP-a i oni sadržavaju podatke o građevinskim područjima. Podaci o građevinskim područjima nastali su obradom prostornih planova županija te prostornih planova uređenja gradova i općina u zavodima za prostorno uređenje županija i Grada Zagreba. Podaci predstavljaju interpretaciju

prostornih planova i moguća su odstupanja od stanja u važećim prostornim planovima. Obradom su obuhvaćeni prostorni planovi na snazi u rujnu 2020 (URL 10).

Preuzeti su podaci o obuhvatu zaštićenih područja u vektorskom obliku putem WFS servisa Bioportala, također dostupnom unutar NIPP-a. Radi se o prostornoj bazi podataka koja sadrži podatke o zaštićenim područjima u Republici Hrvatskoj u kategorijama zaštite prema Zakonu o zaštiti prirode: strogi rezervat, nacionalni park, park prirode, posebni rezervat, regionalni park, spomenik prirode, značajni krajobraz, park - šuma i spomenik parkovne arhitekture (URL 11).

Korištena je Digitalna ortofoto karta iz 2019. g. izrađena od strane DGU (Državna geodetska uprava) kojoj je pristupljeno putem WMS servisa. Digitalna ortofoto karta (DOF5) je službena državna karta i izrađuje se u mjerilu 1:5000 za cjelokupno područje Republike Hrvatske (URL 10).

4.3. KORIŠTENI SOFTVERI

Za provedbu same analize znanstvenog istraživanja korišten je softver QGIS (verzija 3.16.11), softver GRASS GIS (verzija 7.8.5) i softver Microsoft Excel.

QGIS (engl. Quantum GIS) je softver otvorenog koda te je on službeni projekt organizacije *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo). Služi za obradu rasterskih i vektorskih podataka te za manipulaciju bazama podataka. Pruža niz GIS funkcionalnosti koje dolaze kao dio programa, ali je moguće i nadograditi sam softver pomoću raznih dodataka. Podržan je od strane Linux, Unix, 14 Mac OSX, Windows i Android platformi. Program ima šest osnovnih kategorija za različite vrste zadataka (URL 13):

1. Pregledavanje podataka,
2. Istraživanje podataka i izrada karata,

3. Kreiranje, uređivanje, upravljanje i izvoz podataka,
4. Analiza podataka, internetsko objavljivanje karata i
5. Proširivanje QGIS funkcija pomoću dodataka.

Za izradu histograma pojedinih rastera pogodnosti korišten je softver GRASS GIS. To je također softver otvorenog koda koji se koristi za upravljanje geoprostornim podacima, obradu rastera i vektora te izradu karata i kartografskih prikaza (URL 14).

Pomoću softvera Microsoft Excela provedena je AHP metoda kojom su izračunate težine za pojedine kriterije i podkriterije. To je softver koji se uglavnom koristi za matematičke izračune te prikaz rezultata pomoću različitih grafova (URL 15).

Bitno je istaknuti orijentiranost na softwaree i alate otvorenog koda koji su dostupni cijeloj zajednici na korištenje i daljnje nadograđivanje. Upravo zbog dostupnosti ovih softwarea njihova primjena je u porastu, a time rastu i mogućnosti za rješavanje sve kompleksnijih zadataka. Produciranje velikih količina prostornih podataka dobiva puni smisao kada je omogućena njihova daljnja obrada i stvaranje novih informacija, a uz korištenje tehnologija otvorenog koda takva mogućnost dostupna je puno široj skupini korisnika. Ovakav pristup potiče znanstvenike, stručnjake i napredne korisnike da koriste softwaree otvorenog koda i dostupne, otvorene, podatke što vodi prema sve učestalijem korištenju GIS tehnologija u rješavanju mnogih problema koji sadrže prostornu komponentu.

4.4. MULTIKRITERIJSKA GIS ANALIZA

Prilikom pronalaska optimalnih lokacija za izgradnju vjetroelektrana, potrebno je uzeti u obzir veliki broj kriterija koji nisu nužno međusobno kompatibilni i nemaju jednaku važnost. Određeni kriteriji imaju veću vrijednost i bitniji su za krajnji rezultat od drugih kriterija. Prema tome, potrebno je pronaći odgovarajući modalitet za rješavanje i usklađivanje često sukobljenih kriterija, uzimajući u obzir ekonomsku isplativost i vremenski utrošak.

Postoji više metoda koji se mogu koristiti, ali odabrana je metoda multikriterijske analize (AHP), radi se o najpoznatijoj i najšire korištenoj metodi u procesu donošenja odluka.

Multikriterijska analiza je način razmatranja složenog problema koje karakterizira bilo koji način ostvarivanja novčanih i nenovčanih ciljeva, rastavljanje problema na jednostavnije dijelove olakšava kontrolu podataka i prosudbu na osnovu tih dijelova, te onda spajanje dijelova u jednu koherentnu cjelovitu sliku za donošenje odluka. Svrha je da analiza služi kao pomoć pri razmišljanju i donošenju odluka, a ne da donosi odluku. Kao skup vještina, multikriterijska analiza omogućuje različite načine raščlanjivanja složenog problema, od mjerenja stupnja do kojih različite opcije postižu određene ciljeve, određivanja značajnosti nekog cilja te ponovnog sastavljanja dijelova u jednu cjelinu. Srećom, razni računalni programi koji su jednostavni za korištenje su razvijeni da pomognu tehničkoj provedbi same multikriterijske analize (URL 5).

Postupak u multikriterijskoj analizi je sljedeći:

- Postaviti cilj / definirati problem
- Odrediti kriterije
- Standardizirati čimbenike / vrednovanje kriterija
- Odrediti težinu svakog kriterija

- Grupirati kriterije
- Verificirati rezultat

Postupku određivanja kriterija potrebno je posvetiti veliku pažnju kako ne bi došlo do pogrešnog krajnjeg ishoda, kao i u odabiru najrelevantnijih podataka koji su podloga za provedbu multikriterijske analize.

4.4.1. KRITERIJI I PODKRITERIJI ISTRAŽIVANJA

Za određivanje potencijalnih lokacija za izgradnju vjetroelektrana u Hrvatskoj odabrana su 3 glavna kriterija: ekonomski kriterij, društveni kriterij, ekološki kriterij.

4.4.1.1 EKONOMSKI KRITERIJI

- **PROSJEČNA BRZINA VJETRA**

Ujedno je i najbitniji čimbenik za izbor položaja vjetroelektrane. Najvažnija karakteristika je srednja godišnja brzina vjetra na određenoj visini iznad tla. Naime, vjetrogenerator se pokreće kada brzina vjetra poraste iznad otprilike 3 m/s. Pri toj brzini proizvodnja električne energije je vrlo mala. Porastom brzine, količina električne energije se povećava do maksimalne, koja se postiže na brzini vjetra od oko 12 m/s. Daljnjim porastom brzine vjetra količina proizvedene energije se više ne povećava. Kada brzina poraste preko 25 do 30 m/s, vjetroagregat se isključuje jer ne može podnijeti mehanička opterećenja koja uzrokuju tako velike brzine vjetra (URL 1). Iz opisanog načina rada vjetrogeneratora možemo zaključiti da je za idealnu proizvodnju električne energije potrebna brzina vjetra od oko 12 m/s.

- NAGIB PADINA

Nagib padina uvjetuje pristupačnost terena za izgradnju i održavanje vjetroagregata. Nagib se smatra vrlo važnim čimbenikom uglavnom zbog toga što utječe na dostupnost kamiona. Kamioni mogu lako pristupiti područjima s nagibima između 0 i 20%. Nagibi preko 20% su nedostupni vozilima i stoga nisu prikladni za postavljanje vjetroelektrana, odnosno povećanjem nagiba povećavaju se i troškovi izgradnje i održavanja (Konstantinos i dr., 2019).

- UDALJENOST OD POSTOJEĆE ELEKTROENERGETSKE INFRASTRUKTURE

Nadalje, jedan od bitnijih čimbenika je udaljenost od postojećih elektrana, u principu, preferiraju se područja koja su bliža elektroenergetskoj mreži, kako bi energetske gubici bili minimalni, te kako bi se smanjili troškovi izrade novih dalekovoda.

- UDALJENOST OD CESTOVNE INFRASTRUKTURE

Udaljenost od cestovne infrastrukture je bitan čimbenik u proceduri odabiranja optimalne lokacije, zbog činjenice što investitor odabire lokacije koje su već pristupačne ili koje su blizu već postojećim cestama, prvenstveno zbog toga što je ekonomičnije, za smanjenje troškova izgradnje, iskoristiti postojeću cestovnu mrežu nego graditi novu (Horvat, 2019).

4.4.1.2 EKOLOŠKI KRITERIJ

- ZEMLJIŠNI POKROV

Trenutni način korištenja zemljišta je također vrlo bitan faktor za izgradnju vjetroelektrana. Idealne lokacije bi bile udaljena neplodna zemljišta koja imaju nisku uporabnu vrijednost. Tako se, na primjer, ne preferiraju poljoprivredna zemljišta zbog toga što imaju veću gospodarsku vrijednost. Šumske površine se smatraju najmanje pogodnim zbog visoke ekološke vrijednosti, velike hrapavosti površine te najvećih troškova krčenja u odnosu na ostale načine korištenja zemljišta. Dok neki autori šumske prostore smatraju nepogodnim, drugi čak definiraju i zonu ograničenja oko njih (Horvat, 2019).

- ZAŠTIĆENA PODRUČJA

Zaštićena područja su ujedno i isključujući faktor kod odabira lokacije. U Republici Hrvatskoj su zaštićena područja definirana kroz sedam različitih kategorija (strogi rezervat, nacionalni park, park prirode, posebni rezervat, regionalni park, spomenik prirode, značajni krajobraz, park-šuma i spomenik parkovne arhitekture) te su unatoč različitom stupnju zaštite, sve navedene kategorije u ovom istraživanju tretirane isto, tj. kao nepogodne za razvoj vjetroelektrana (Horvat, 2019).

- VODENE POVRŠINE

Vodne površine svake vrste su također isključene iz razvoja iskorištavanja energije vjetra. Rijeke nisu dobre lokacije za vjetroelektrane zbog toga što utječe na tok rijeke, te će troškovi

izgradnje biti visoki. Područja unutar 200 m od vodenih površina će biti isključeni (Konstantinos i dr., 2019).

4.4.1.3 DRUŠTVENI KRITERIJ

- UDALJENOST OD NASELJA

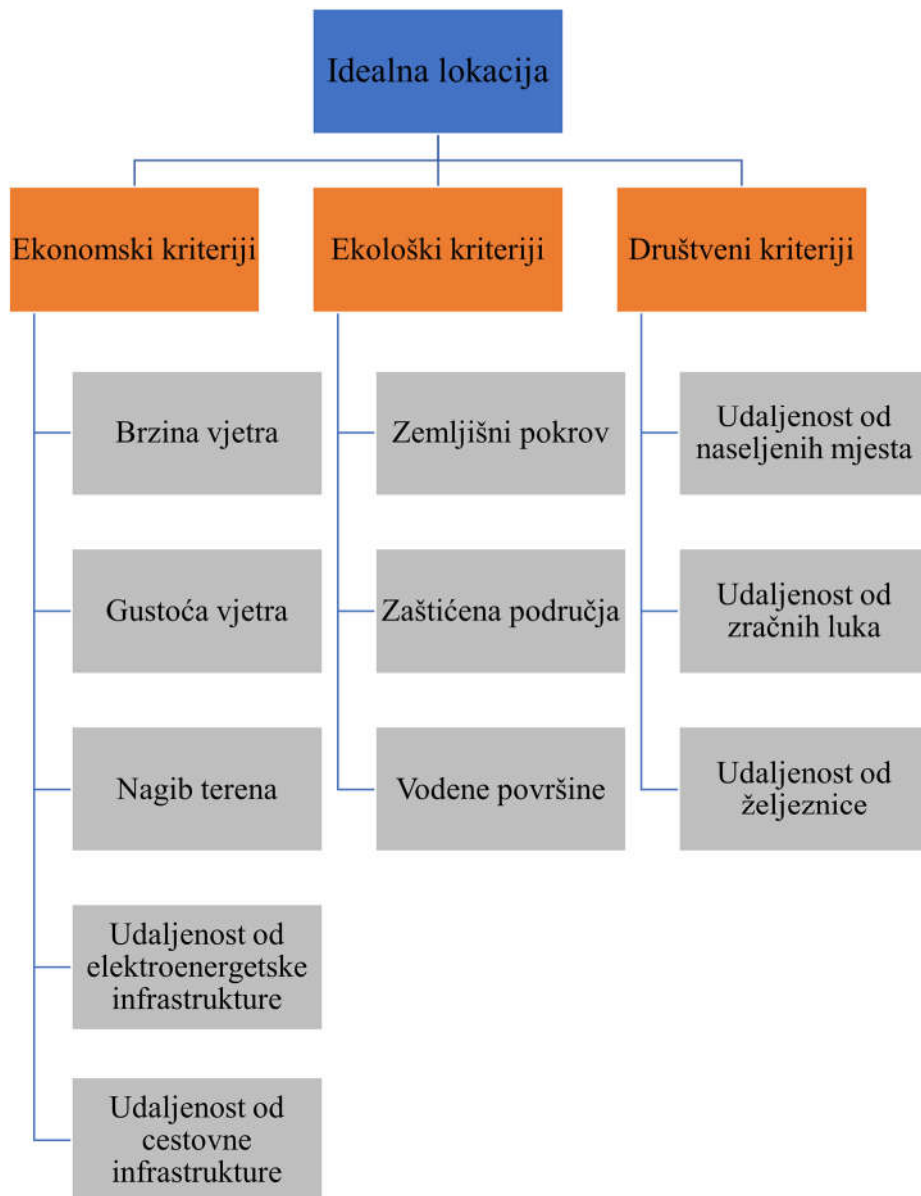
Udaljenost od naselja je najvažniji socijalni kriterij čijom implementacijom mogu biti umanjeni ili potpuno uklonjeni utjecaj buke, efekt treperenja sjene te vizualni utjecaj vjetroelektrana. Smještanje na što većim udaljenostima od naselja ima pozitivan utjecaj i na sam rad vjetroelektrana, jer se izbjegava negativni utjecaj turbulencija vjetra i efekta sjene uzrokovanih stambenim objektima (Horvat, 2019).

- UDALJENOST OD ZRAČNIH LUKA

Zbog sigurnosnih razloga u zračnome prometu potrebno je isključiti lokacije koje su u blizini zračnih luka.

4.4.2. PROCES ANALITIČKE HIJERARHIJE (AHP)

Jedna od metoda je proces analitičke hijerarhije (eng. AHP – Analytic Hierarchy Process) kojeg je utemeljio Thomas I. Saaty. Postupak se bazira na strukturiranju problema prema razinama. Na taj način se kompleksni problem segmentira na dijelove te donošenje odluka na mikrorazini postaje lakše (URL 6). AHP metoda korištena je u sklopu ovoga rada, a prvi korak je stvaranje hijerarhijskog stabla koje sadrži ulazne kriterije. Slika 7 prikazuje kriterije strukturirane unutar hijerarhijskog grafa.



Slika 7. Hijerarhijski odnos kriterija

Idući korak je formiranje matrice omjera. Matrica se kreira na način da se glavni kriteriji, a potom i podkriteriji, međusobno usporede i rangiraju prema Saatyjevoj skali. Skalu je definirao autor ove metode, te nam ona pomaže pri procjeni omjera važnosti dvaju kriterija. Skala se sastoji od pet stupnjeva intenziteta i četiri međustupnja. Međustupnjevi se koriste u slučaju kada osnovni stupnjevi intenziteta nisu dovoljni za prikaz malih razlika u omjerima između kriterija.

Za prikaz obratnih odnosa među kriterijima koriste se recipročne vrijednosti. Saatyjeva skala prikazana je tablicom 4, a matrica omjera glavnih kriterija tablicom 5.

Tablica 4. Saatyjeva skala

Intenzitet važnosti	Definicija	Objašnjenje
1	Jednako važno	Dva kriterija jednako doprinose cilju
3	Umjereno važno	Na temelju iskustva I procjena daje se umjerena prednost jednom kriteriju ili alternativu u odnosu na drugu
5	Strogo važnije	Na temelju iskustva I procjena strogo se favorizira jedan kriterij u odnosu na drugi
7	Vrlo stroga, dokazana važnost	Jedan kriterij izrazito se favorizira u odnosu na drugi; njegova dominacija dokazuje se u praksi
9	Ekstremna važnost	Dokazi na temelju kojih se favorizira jedan kriterij ili alternativa u odnosu na drugi potvrđeni su s najvećom uvjerljivošću
2, 4, 6, 8	Međuvrijednosti	

Tablica 5. Matrica omjera glavnih kriterija

	Ekonomski kriteriji	Ekološki kriteriji	Društveni kriteriji
Ekonomski kriteriji	1.00	5.00	3.00
Ekološki kriteriji	0.20	1.00	0.33
Društveni kriteriji	0.33	3.00	1.00

Naredni korak je normaliziranje matrice omjera na način da se vrijednosti po stupcima zbroje, te se svaka vrijednost unutar stupca podijeli sa dobivenim zbrojem. Posljednji korak ovog postupka je izračun težinskih koeficijenata pojedinog kriterija, odnosno prioriteta. Prioriteti se računaju kao aritmetička sredina vrijednosti po recima za pojedini kriterij. Potrebno je izračunati najveću svojstvenu vrijednost λ_{\max} koja predstavlja sumu svih produkata između zbroja redaka matrice omjera težina i njihovih pripadnih težinskih koeficijenata, zatim vrijednost CI koja označava indeks konzistencije i omjer konzistencije Cr koji mora biti manji od 0,1. U tablici 6 dana je normalizirana matrica omjera sa pripadnim težinskim koeficijentima.

Tablica 6. Normalizirana matrica omjera s pripadnim težinskim koeficijentima

	Ekonomski kriteriji	Ekološki kriteriji	Društveni kriteriji	Težinski koeficijent
Ekonomski kriteriji	0,65	0,56	0,69	0,63
Ekološki kriteriji	0,13	0,11	0,08	0,11
Društveni kriteriji	0,22	0,33	0,23	0,26

$$\lambda_{\max} = 3,055$$

$$CI = 0,028$$

$$CR = 0,048$$

Isti postupak ponovljen je za sve podkriterije te su normalizirane matrice omjera i težinski koeficijenti dani u tablicama 7, 8 i 9.

Tablica 7. Podkriteriji ekonomskog kriterija – normalizirana matrica omjera sa pripadnim težinskim koeficijentima

	Brzina vjetra	Gustoća vjetra	Nagib	Udaljenost od EM mreže	Udaljenost od cesta	Težinski koeficijent
Brzina vjetra	0,44	0,49	0,38	0,44	0,33	0,42
Gustoća vjetra	0,22	0,24	0,29	0,29	0,27	0,26
Nagib	0,11	0,08	0,10	0,07	0,13	0,10
Udaljenost od EM mreže	0,15	0,12	0,19	0,15	0,20	0,16
Udaljenost od cesta	0,09	0,06	0,05	0,05	0,07	0,06

$$\lambda_{\max}=5,090$$

$$CI=0,023$$

$$CR = 0,020$$

Tablica 8. Podkriteriji ekološkog kriterija – normalizirana matrica omjera sa pripadnim težinskim koeficijentima

	Pokrov	Zaštićena područja	Vode	Težinski koeficijent
Pokrov	0,55	0,57	0,50	0,54
Zaštićena područja	0,27	0,29	0,33	0,30
Vode	0,18	0,14	0,17	0,16

$$\lambda_{\max}= 3,011$$

$$CI=0,006$$

$$CR=0,010$$

Tablica 9. Podkriteriji društvenog kriterija – normalizirana matrica omjera sa pripadnim težinskim koeficijentima

	Naselja	Zračne luke	Željeznice	Težinski koeficijent
Naselja	0,74	0,77	0,70	0,74
Zračne luke	0,15	0,15	0,20	0,17
Željeznice	0,11	0,08	0,10	0,09

$\lambda_{\max}= 3,025$

CI=0,012

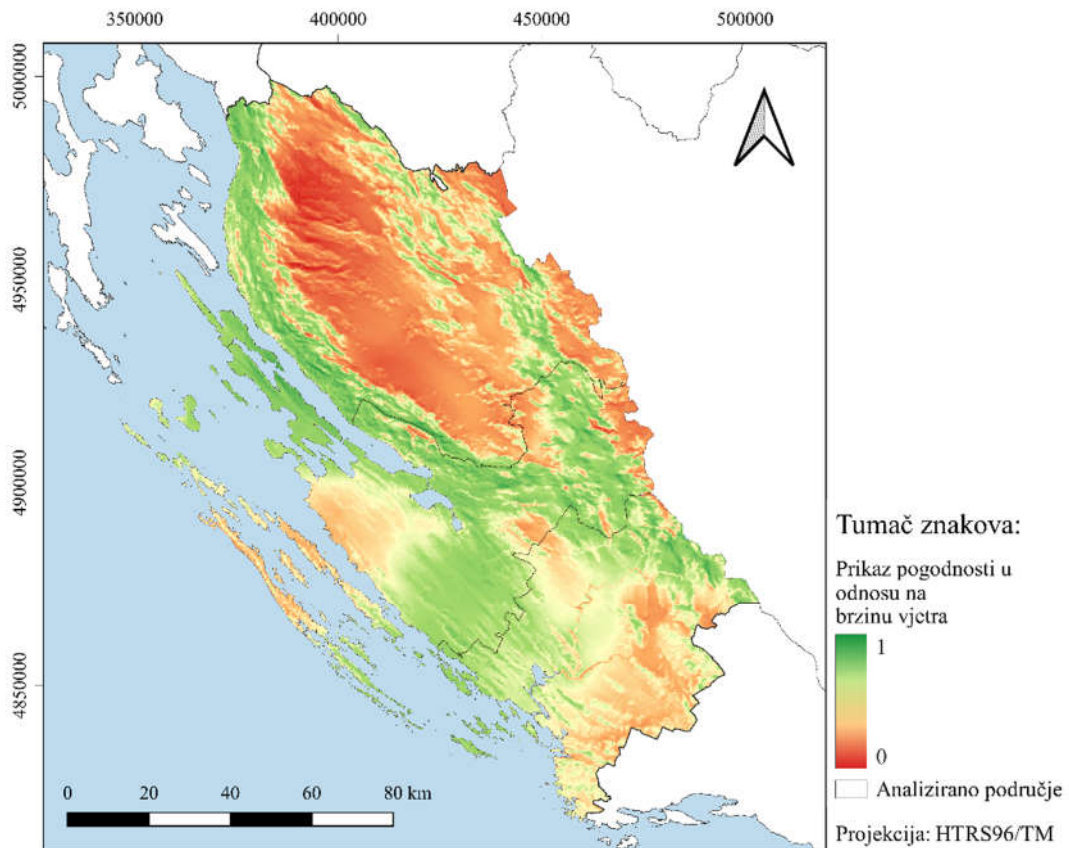
CR=0,021

5. IZRADA ANALIZE

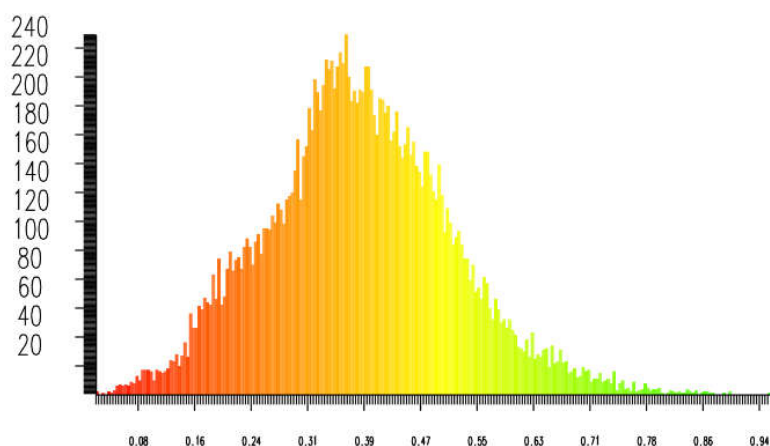
Po preuzimanju svih potrebnih podataka pristupilo se njihovoj obradi kako bi bili pogodni za daljnju analizu. Svi slojevi izrezani su na predmetno područje koje obuhvaća Ličko-senjsku županiju, Zadarsku županiju i Šibensko-kninsku županiju. Nakon učitavanja podataka, provedena je transformacija u službeni projekcijski koordinatni referentni sustav Republike Hrvatske (HTRS96/TM). Provela se pretvorba vektorskih slojeva u rasterske radi kompatibilnosti podataka i mogućnosti međusobne manipulacije. Vrijednosti rastera su normalizirane, odnosno rasponi svih rastera svedeni su na vrijednosti između 0 i 1, koristeći naredbu unutar QGIS-a „*Raster Normalization*“. Vrijednost 1 označava najpovoljniju lokaciju odabranog kriterija, dok vrijednost 0 označava nepogodnu lokaciju, odnosno prilikom dobivanja konačnog rezultata, sve lokacije koje su ocijenjene kao nepogodne su isključene iz daljnjih analiza. Također, za svaki od navedenih rastera je izrađen histogram, unutar programa „*GRASS GIS*“ kako bi se vjerodostojnije prikazala distribucija podataka, s obzirom na svaki od navedenih kriterija.

5.1. EKONOMSKI KRITERIJI

Brzina vjetra, podkriterij je ekonomskog kriterija sa najvećim težinskim faktorom. Zelenom bojom prikazano je područje s najvećom brzinom vjetra na 100 m visine (Slika 8) dok je razdioba vrijednosti rastera prikazana na slici 9.

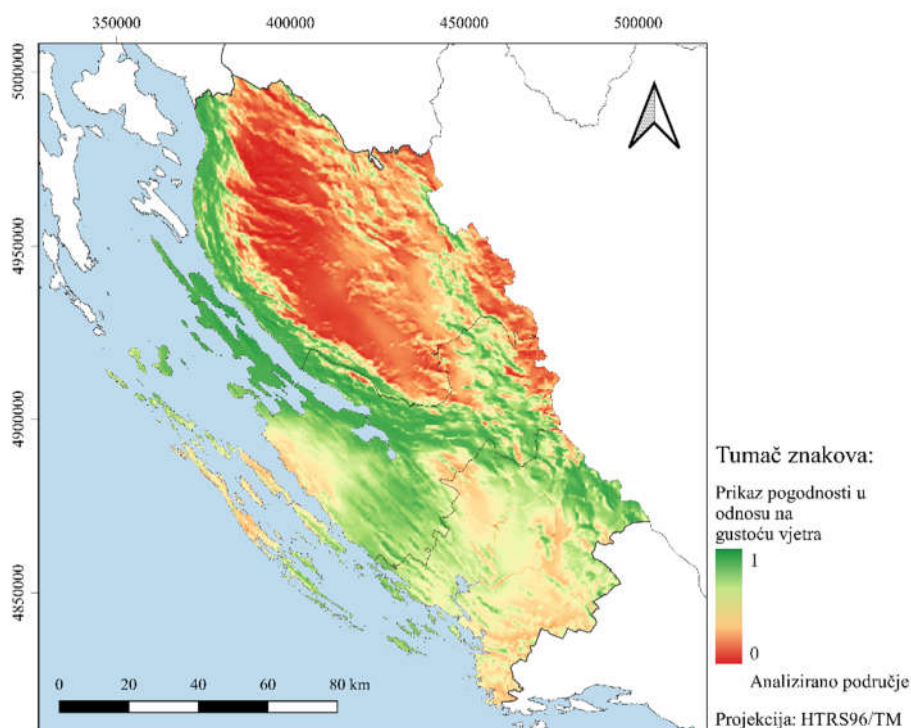


Slika 8. Prikaz pogodnosti u odnosu na brzinu vjetra

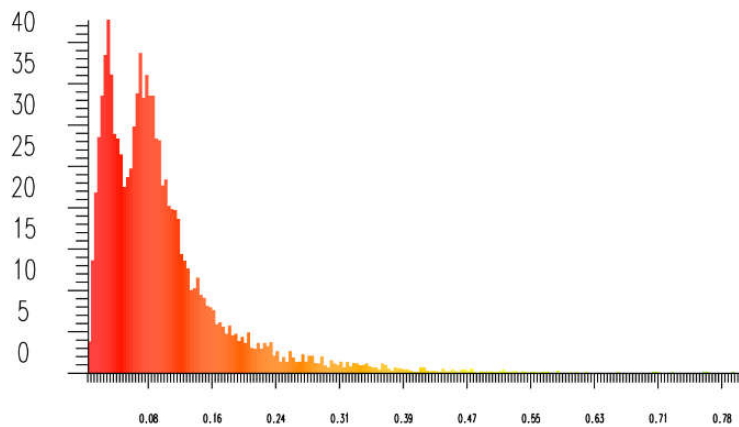


Slika 9. Prikaz razdiobe pogodnosti u odnosu na brzinu vjetra (Napomena: apscisa-vrijednost pogodnosti; ordinata-frekvencija pogodnosti)

Normalizirane vrijednosti gustoće vjetra prikazane su na slici 10, te je uočljivo podudaranjem sa prikazom pogodnosti u odnosu na brzinu vjetra (Slika 8). Slika 11 prikazuje razdiobu pogodnosti u odnosu na brzinu vjetra.

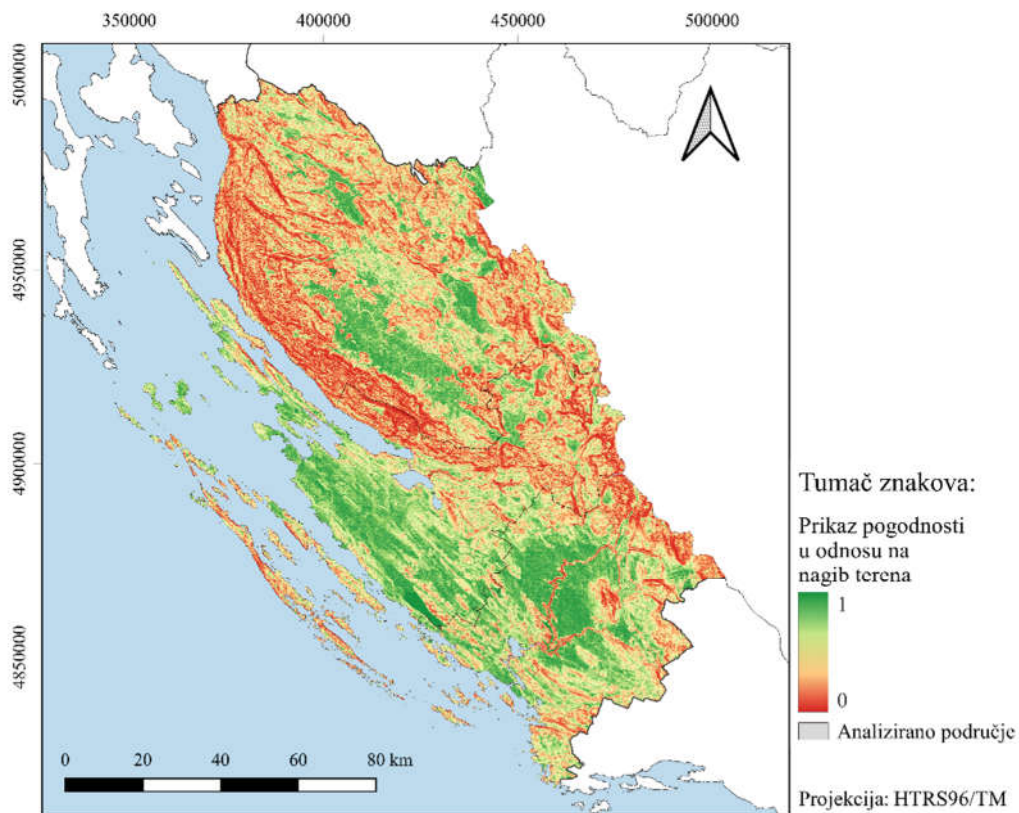


Slika 10. Prikaz pogodnosti u odnosu na gustoću vjetra

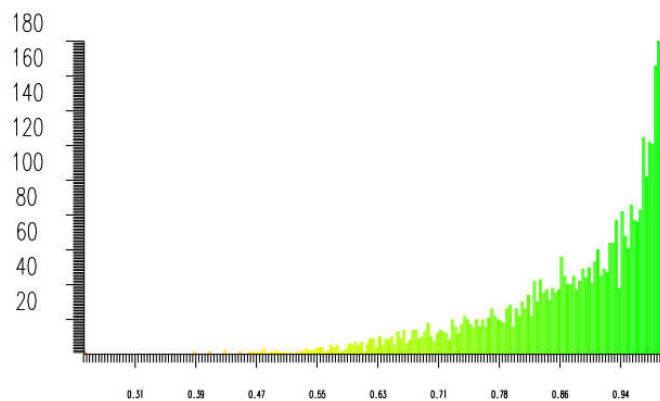


Slika 11. *Prikaz razdiobe pogodnosti u odnosu na gustoću vjetra*

Nagib terena izrađen je pomoću naredbe „slope“ unutar QGIS-a te je dobiven nagib u stupnjevima. Normaliziranjem, vrijednosti su svedene na raspon od 0 do 1 što je prikazano na slici 12. Slika 13 prikazuje razdiobu pogodnosti u odnosu na nagib terena.

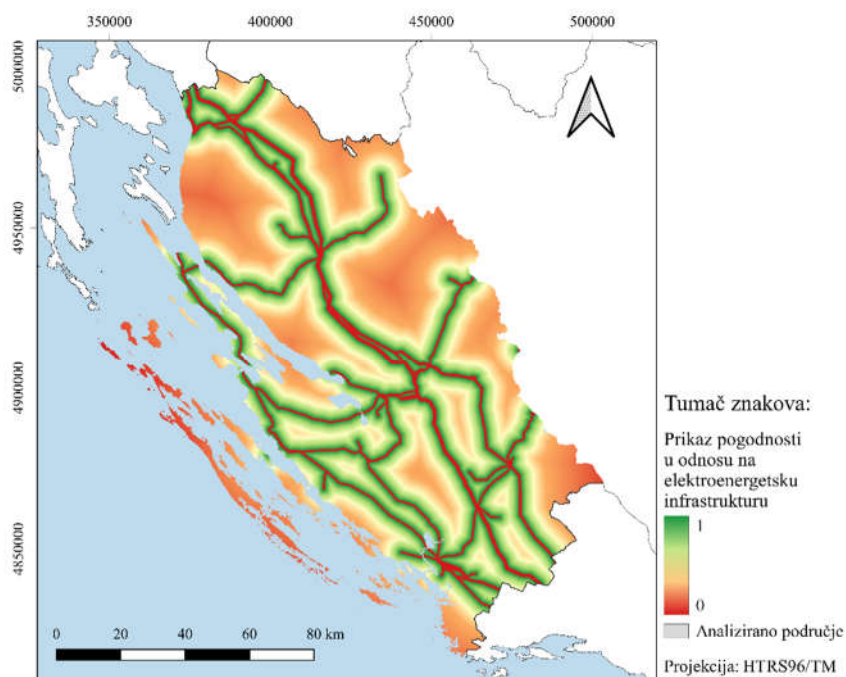


Slika 12. *Prikaz pogodnosti u odnosu na nagib terena*

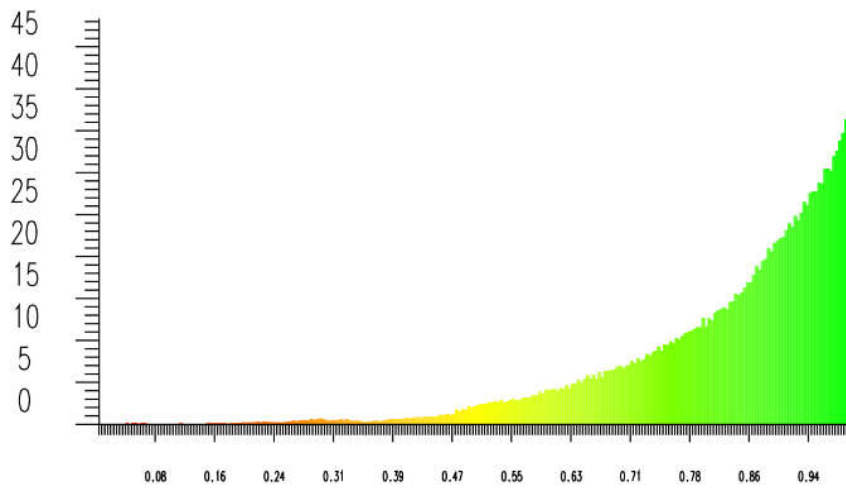


Slika 13. Prikaz razdiobe pogodnosti u odnosu na nagib terena

Slika 14 prikazuje pogodnost područja s obzirom na udaljenost od elektroenergetske infrastrukture. Pojas od 250 m sa obje strane vodova označen je kao nepogodan, a ostalo područje stupnjevano je s obzirom na udaljenost tako da su bliža područja pogodnija. Prikaz razdiobe dan je na slici 15.

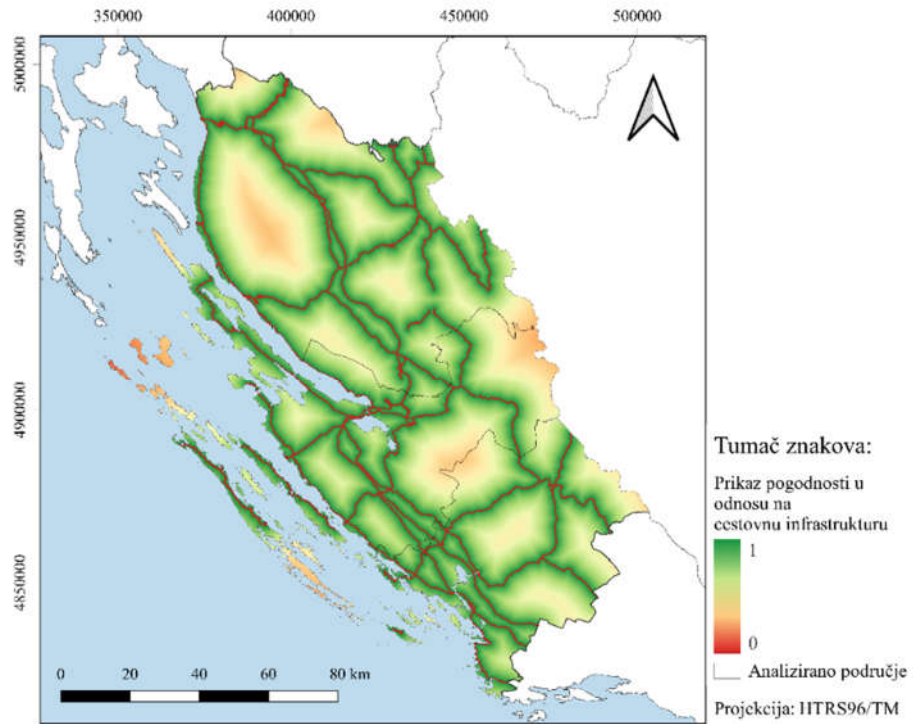


Slika 14. Prikaz pogodnosti u odnosu na elektroenergetsku infrastrukturu

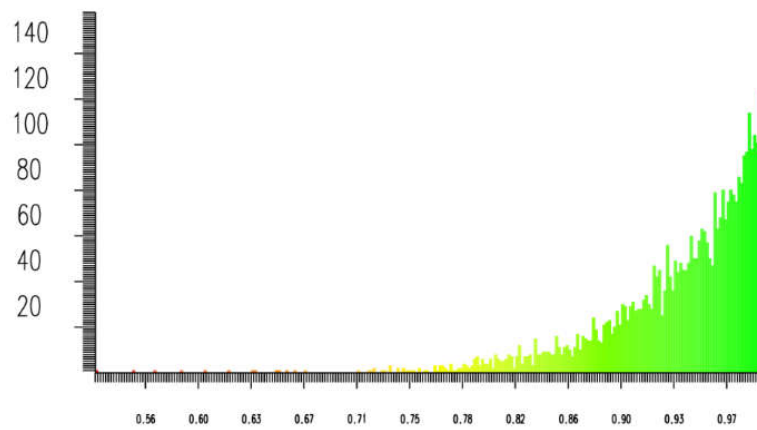


Slika 15. Prikaz razdiobe pogodnosti u odnosu na elektroenergetsku infrastrukturu

Slika 16 prikazuje pogodnost područja s obzirom na udaljenost od cestovne infrastrukture. Pojas od 200 m sa obje strane cesta označen je kao nepogodan, a ostalo područje stupnjevano je s obzirom na udaljenost tako da su bliža područja pogodnija. Prikaz razdiobe dan je na slici 17.



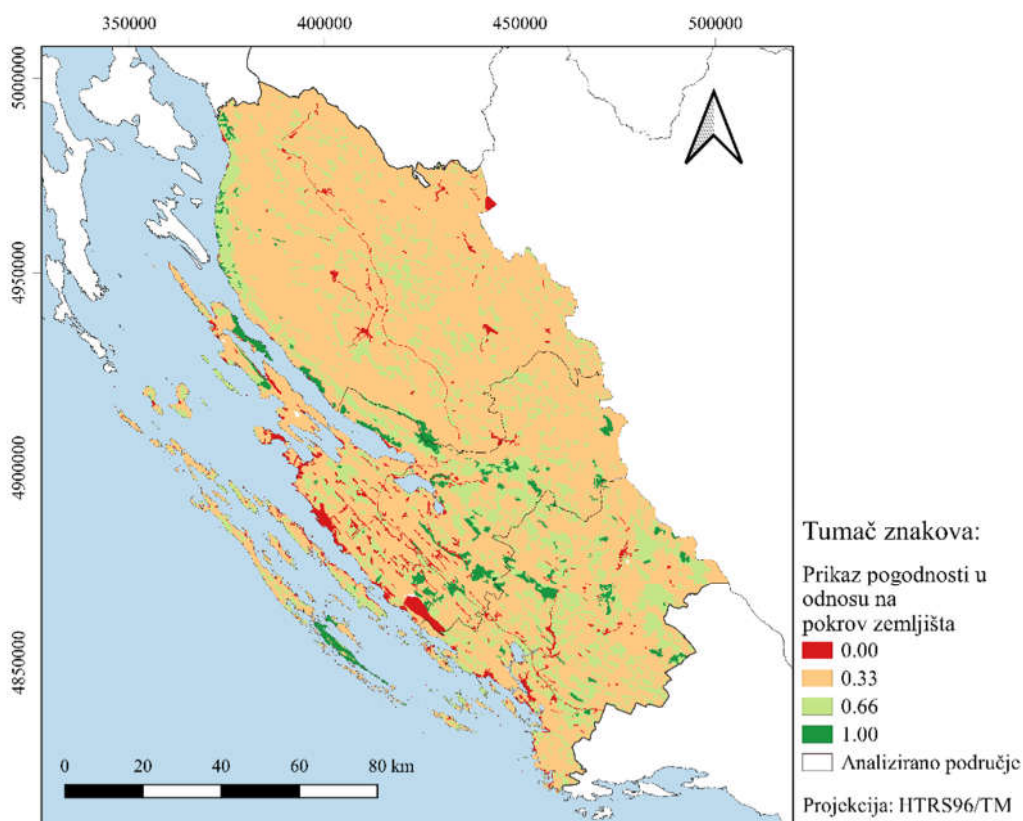
Slika 16. Prikaz pogodnosti u odnosu na cestovnu infrastrukturu



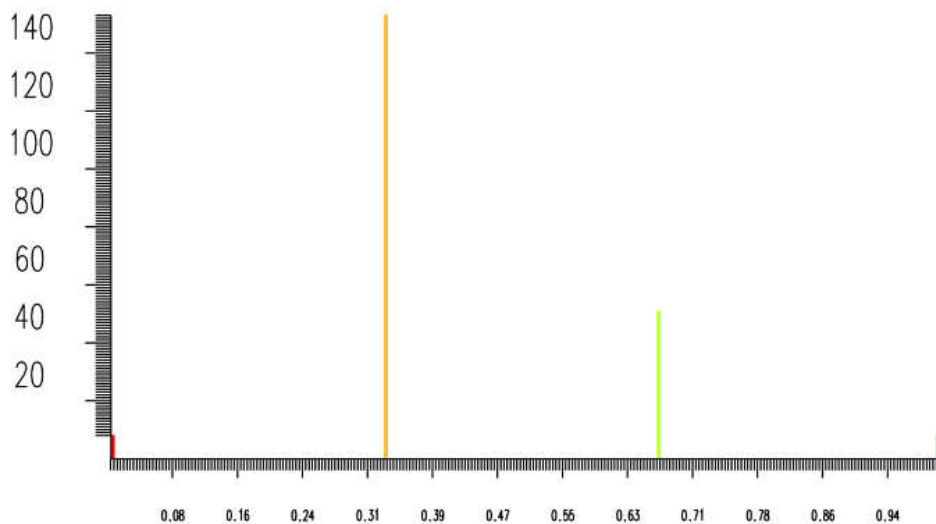
Slika 17. Prikaz razdiobe pogodnosti u odnosu na cestovnu infrastrukturu

5.2. EKOLOŠKI KRITERIJI

Pokrov zemljišta klasificiran je u 4 klase. Nepogodnom području dodijeljen je faktor 0 (vodene površine i izgrađeno područje), faktor 0,33 dodijeljen je slabo pogodnom području (šumsko područje i poljoprivredne površine), faktor 0,66 pogodnom području (niska vegetacija) i faktor 1 iznimno pogodnom području (golo tlo, makija) (Slika 18). Prikaz razdiobe nije kontinuiran, već prikazuje 4 diskretne klase (Slika 19).

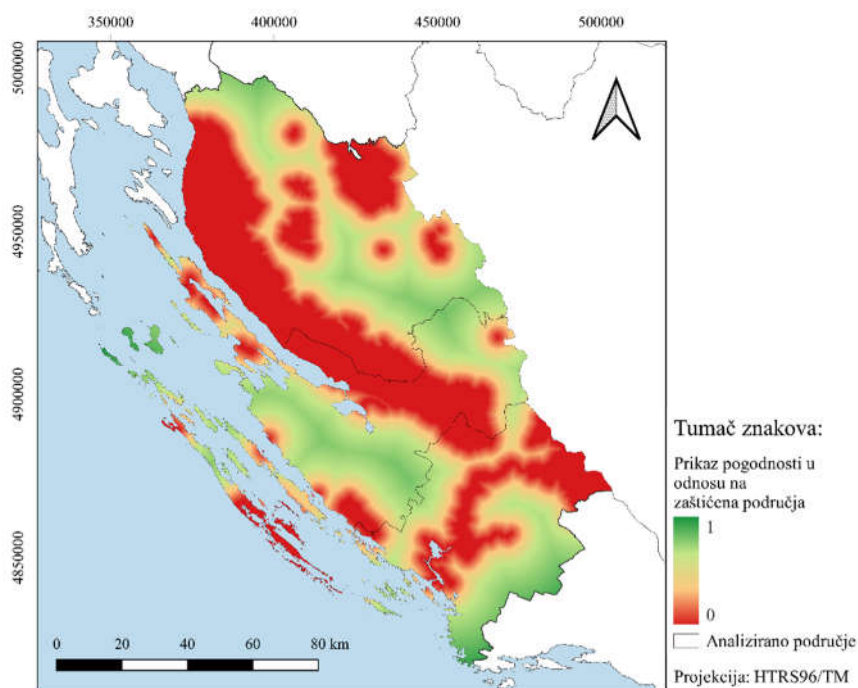


Slika 18. Prikaz pogodnosti u odnosu na pokrov zemljišta

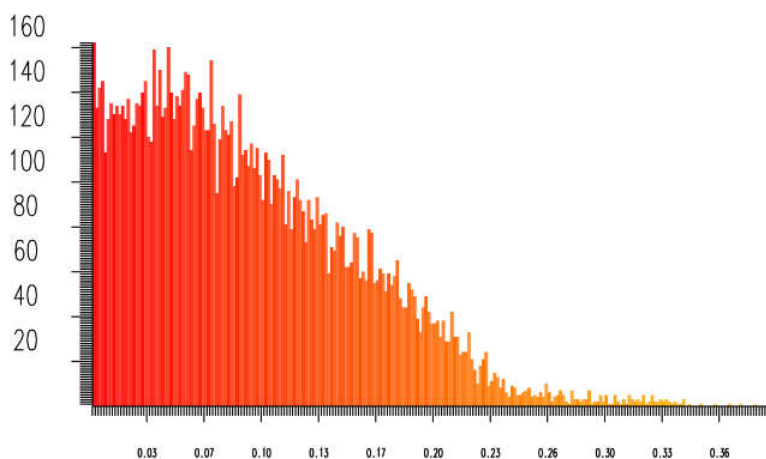


Slika 19. Prikaz razdiobe pogodnosti u odnosu na pokrov zemljišta

Zaštićena područja i zona od 500 m uz njih označeni su kao nepogodno područje. Ostalo područje stupnjevano je u rasponu od 0 do 1, tako da područja koja se nalaze dalje od zaštićenih područja imaju veće vrijednosti (Slika 20). Prikaz razdiobe dan je na slici 21.

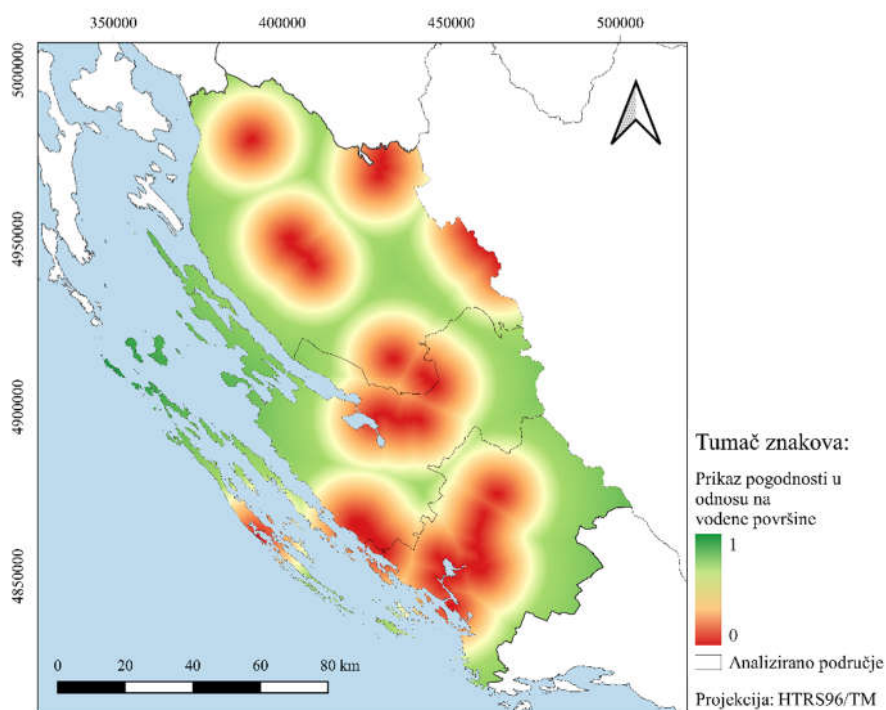


Slika 20. Prikaz pogodnosti u odnosu na zaštićena područja

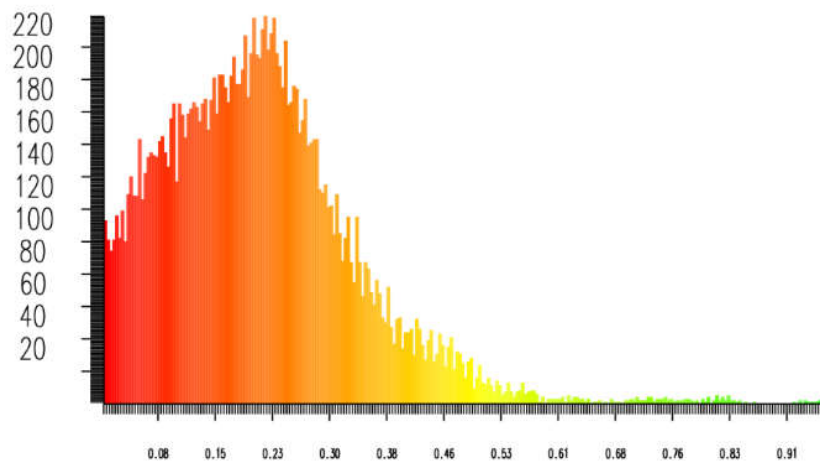


Slika 21. Prikaz razdiobe pogodnosti u odnosu na zaštićena područja

Vodene površine i područje od 500 m uz njih označeno je kao nepogodno. Ostatak područja stupnjevan je u rasponu od 0 do 1, tako da područja koja se nalaze dalje od vodenih površina imaju veće vrijednosti (Slika 22). Prikaz razdiobe dan je na slici 23.



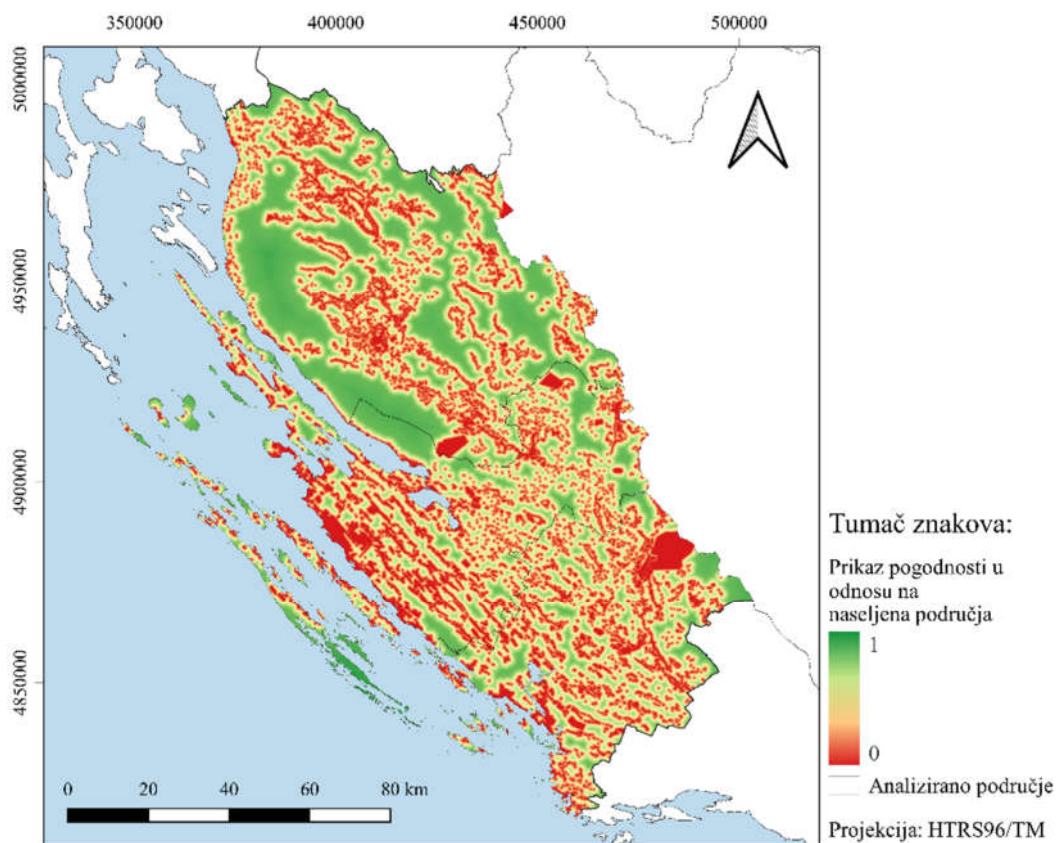
Slika 22. Prikaz pogodnosti u odnosu na vodene površine



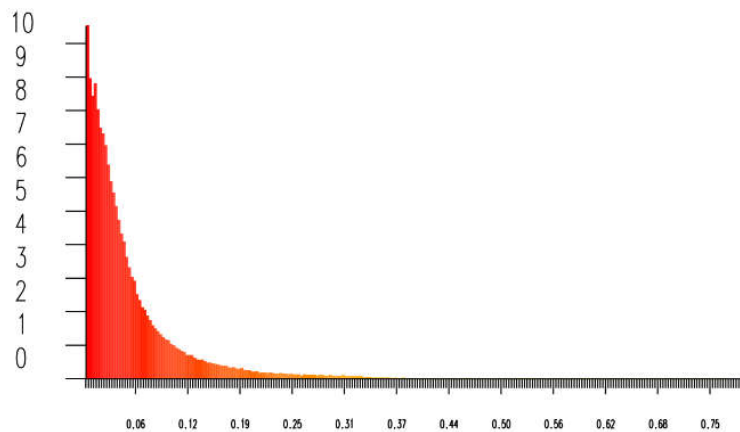
Slika 23. Prikaz razdiobe pogodnosti u odnosu na vodene površine

5.3. DRUŠTVENI KRITERIJI

Naselja i područje od 200 m uz njih označena su kao nepogodna. Ostatak područja stupnjevan je u rasponu od 0 do 1, tako da područja koja se nalaze dalje od naselja imaju veće vrijednosti (Slika 24). Prikaz razdiobe dan je na slici 25.

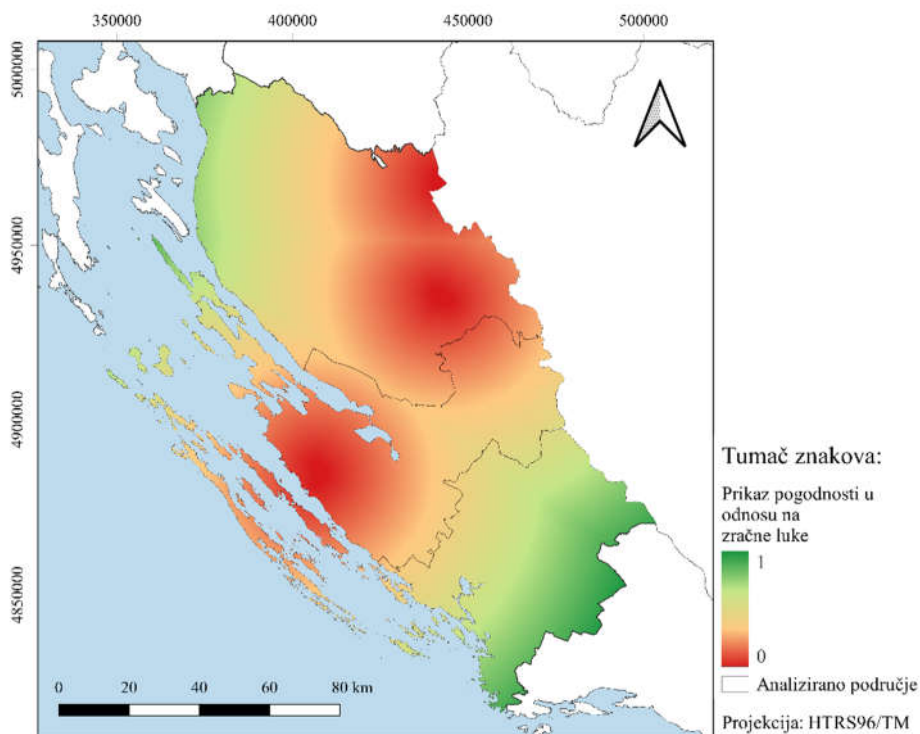


Slika 24. Prikaz pogodnosti u odnosu na naseljena područja

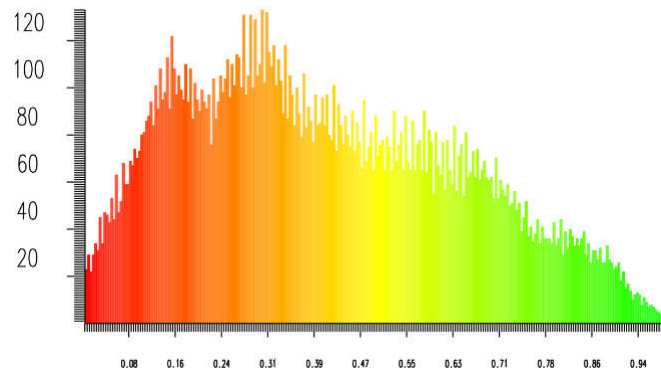


Slika 25. Prikaz razdiobe pogodnosti u odnosu na naseljena područja

Na ovome području se nalaze zračne luke te je područje, koje zauzimaju i pojas od 500 m oko njih, označeno kao nepogodno. Ostatak područja stupnjevan je u rasponu od 0 do 1, tako da područja koja se nalaze dalje od zračnih luka imaju veće vrijednosti (Slika 26). Prikaz razdiobe dan je na slici 27.

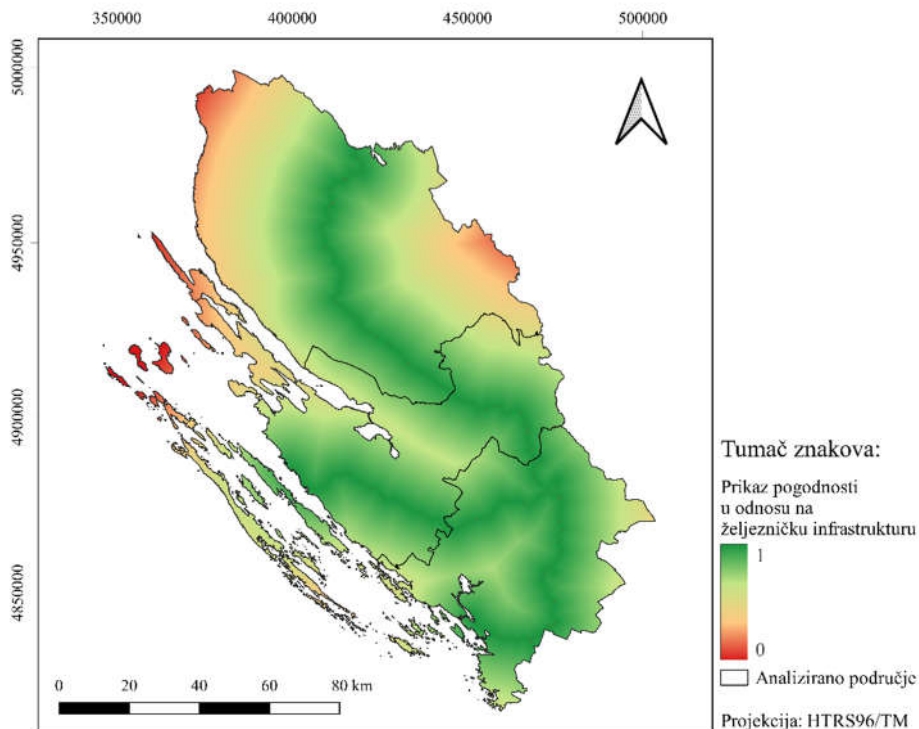


Slika 26. Prikaz pogodnosti u odnosu na zračne luke

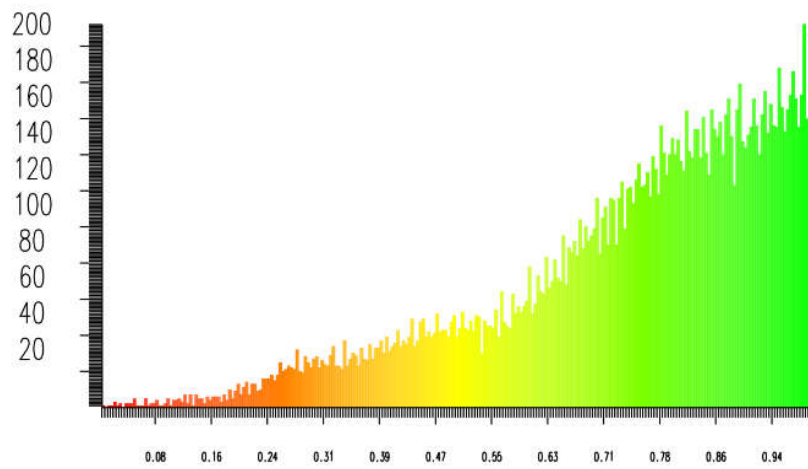


Slika 27. Prikaz razdiobe pogodnosti u odnosu na zračne luke

Željeznička infrastruktura značajna je zbog dopreme dijelova konstrukcije vjetroelektrana. željeznice i područje od 100 m uz njih označeno je kao nepodno. Ostatak područja stupnjevan je u rasponu od 0 do 1, tako da područja koja se nalaze dalje od željeznica imaju manje vrijednosti (Slika 24). Prikaz razdiobe dan je na slici 25.



Slika 28. Prikaz pogodnosti u odnosu na željezničku infrastrukturu



Slika 29. Prikaz razdiobe pogodnosti u odnosu na željezničku infrastrukturu

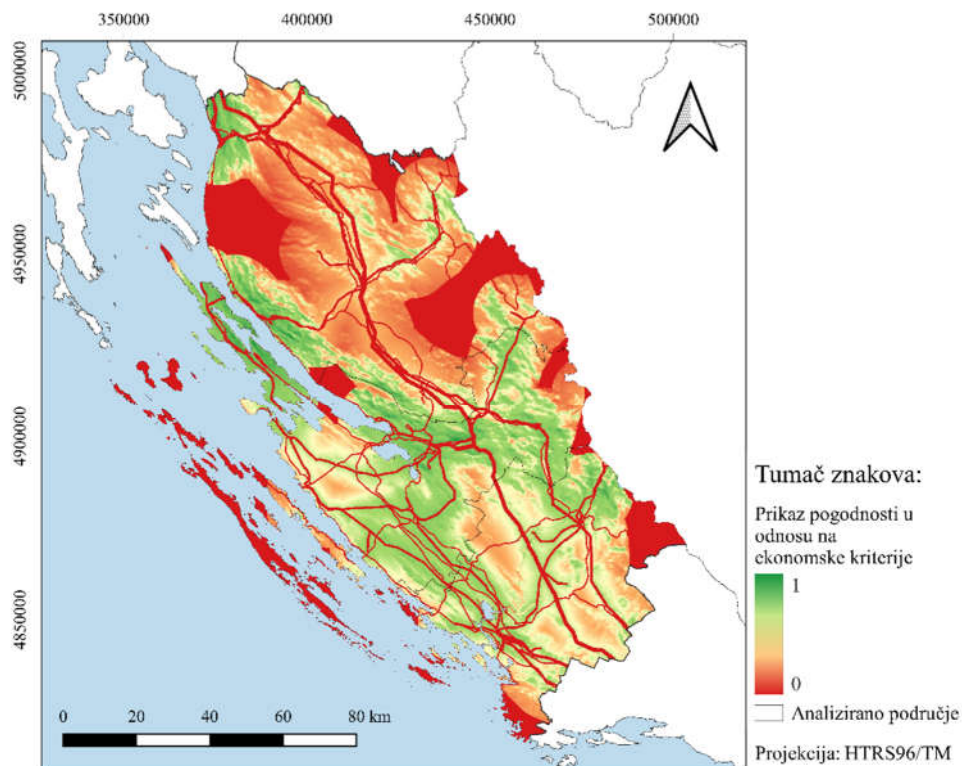
6. REZULTATI

6.1. PRIKAZI NADKRITERIJA

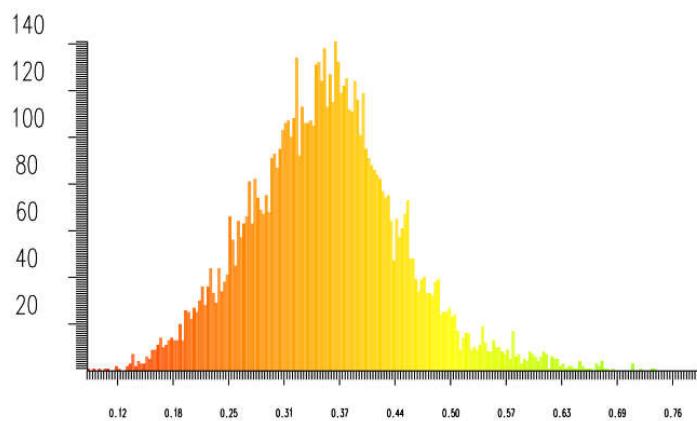
Nakon pripreme rastera za svaki podkriterij izračunati su u modulu „*Raster Calculator*“ izlazni rasteri za svaki nadkriterij. Računanje je provedeno koristeći težinske koeficijente dobivene AHP metodom (Tablica 7, 8 i 9).

Računanje ekonomskog kriterija (Slika 30) provedeno je sljedećom formulom unutar „*raster calculatora*“, razdioba pogodnosti prikazan je na slici 31.

$$\text{if} (\text{"brzina_vjetra"}=0 \text{ OR } \text{"gustoca"}=0 \text{ OR } \text{"nagib"}=0 \text{ OR } \text{"EE_infrastruktura"}=0 \text{ OR } \\ \text{"Ceste"}=0, 0, 0.42*\text{"brzina_vjetra"} + 0.26*\text{"gustoca"} + 0.10*\text{"nagib"} + \\ 0.16*\text{"EE_infrastruktura"} + 0.06*\text{"ceste"}).$$



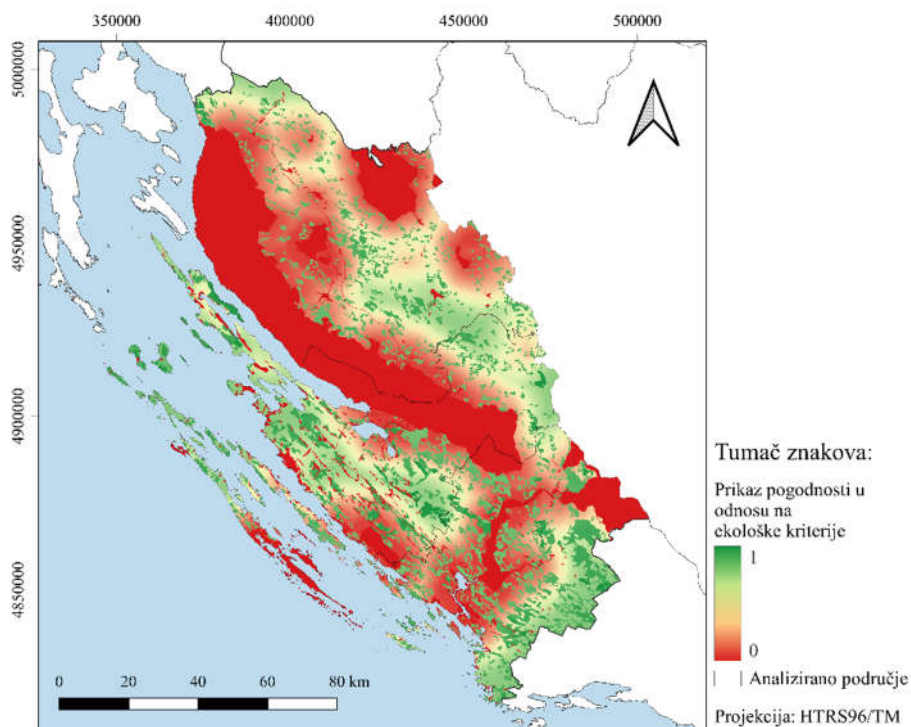
Slika 30. Prikaz pogodnosti u odnosu na ekonomske kriterije



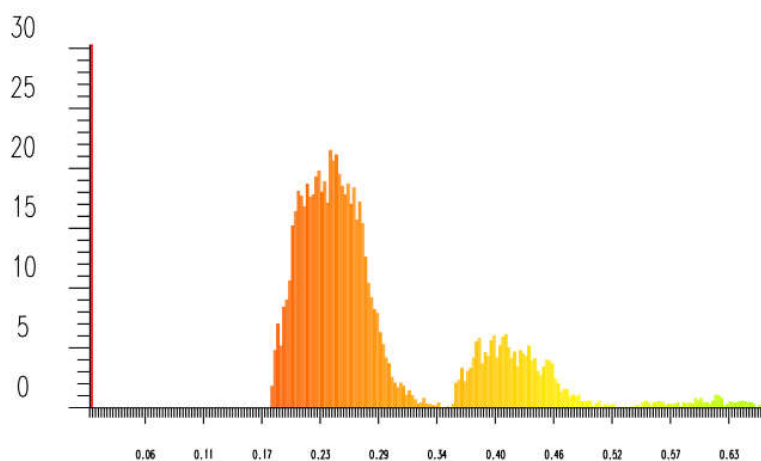
Slika 31. Prikaz razdiobe pogodnosti u odnosu na ekonomske kriterije

Računanje ekološkog kriterija (Slika 32) provedeno je sljedećom formulom, histogram koji prikazuje razdiobu pogodnosti je na slici 33.

$$\text{if} (\text{"pokrov"}=0 \text{ OR } \text{"z_podrucja"}=0 \text{ OR } \text{"vodene_povrsine"}=0, 0, 0.54*\text{"pokrov"} + 0.3*\text{"z_podrucja"} + 0.16*\text{"vodene_povrsine"}).$$



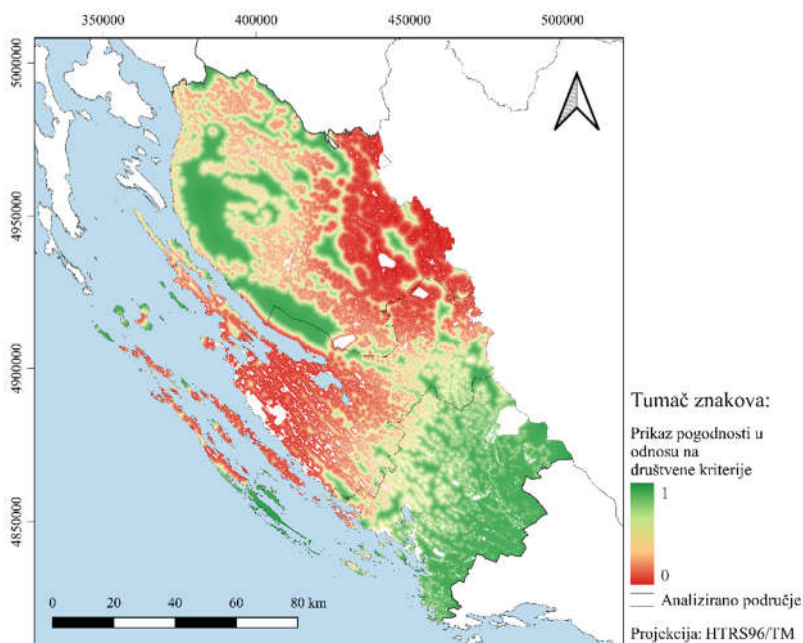
Slika 32. Prikaz pogodnosti u odnosu na ekološke kriterije



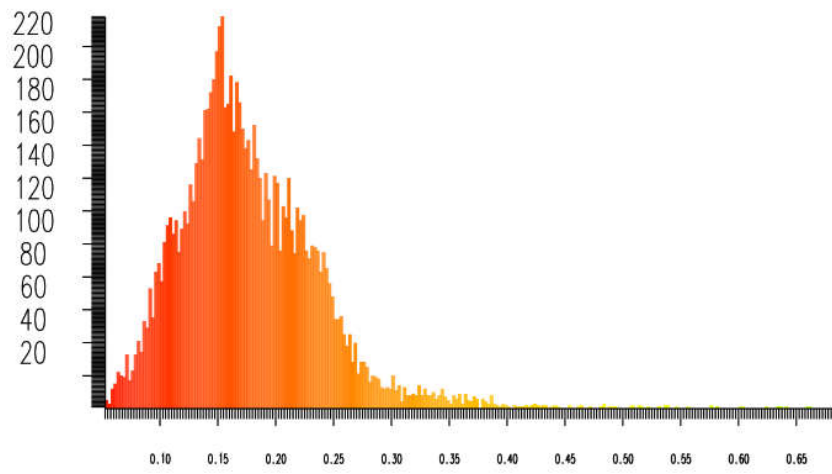
Slika 33. Prikaz razdiobe pogodnosti u odnosu na ekološke kriterije

Računanje društvenog kriterija (Slika 34) provedeno je sljedećom formulom, prikaz rasapa pogodnosti je na slici 35.

$$\text{if} (\text{"naselja"}=0 \text{ OR } \text{"zracne_luke"}=0 \text{ OR } \text{"zeljeznice"}=0, 0, 0.74*\text{"naselja"} + 0.17*\text{"zracne_luke"} + 0.09*\text{"zeljeznice"}).$$



Slika 34. Prikaz pogodnosti u odnosu na društvene kriterije

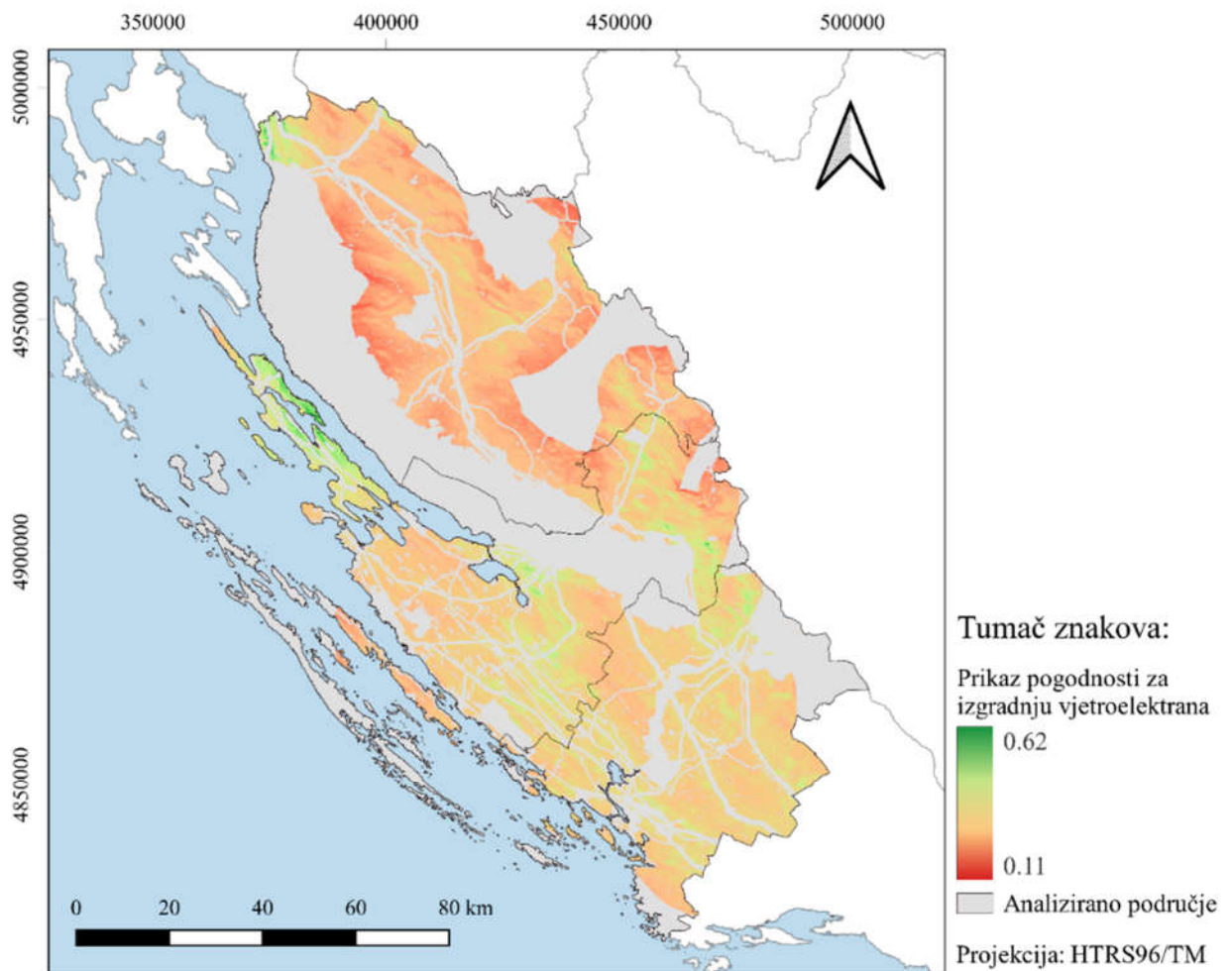


Slika 35. Prikaz razdiobe pogodnosti u odnosu na društvene kriterije

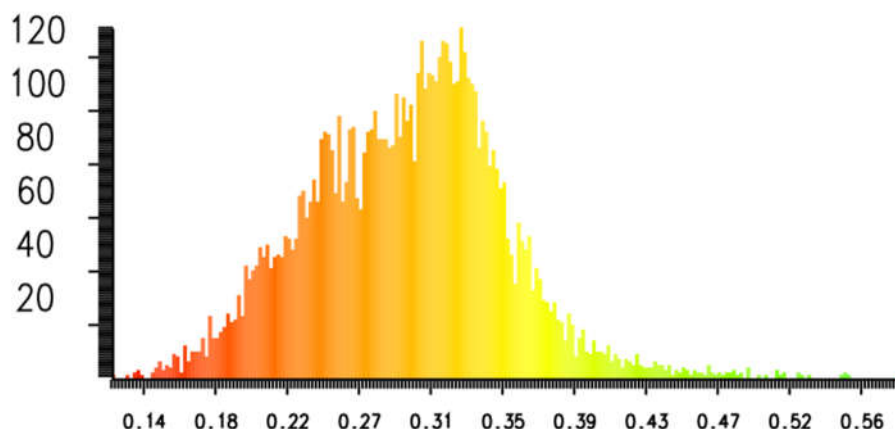
6.2. PRIKAZ POGODNOSTI ZA IZGRADNJU VJETROELEKTRANA

Nakon izrade rastera pogodnosti za sve nadkriterije, pristupilo se izradi konačnog rastera koji prikazuje pogodnosti za izgradnju vjetroelektrana (Slika 36). Pri računanju konačnog rastera, korišteni su težinski koeficijenti iz tablice 6, prema formuli:

$$\text{if} (\text{"ekonomski@1"}=0 \text{ OR } \text{"ekološki1@1"}=0 \text{ OR } \text{"društveni@1"}=0, 0, 0.63*\text{"ekonomski"} + 0.11*\text{"ekološki"} + 0.26*\text{"društveni"}).$$

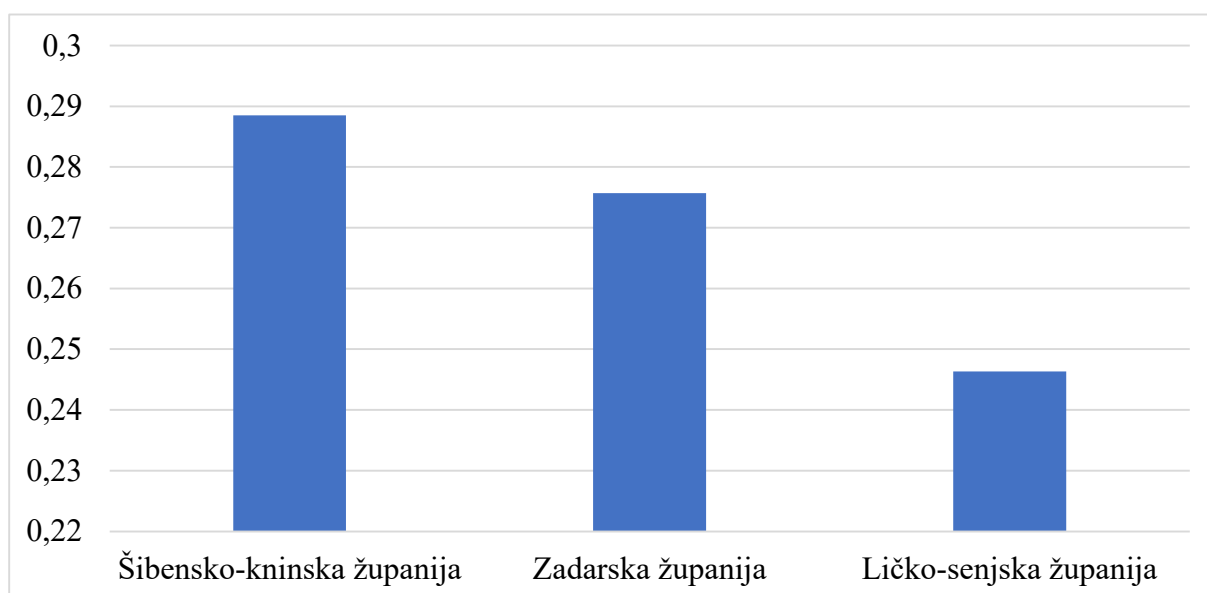


Slika 36. Prikaz pogodnosti za izgradnju vjetroelektrana na predmetnom području



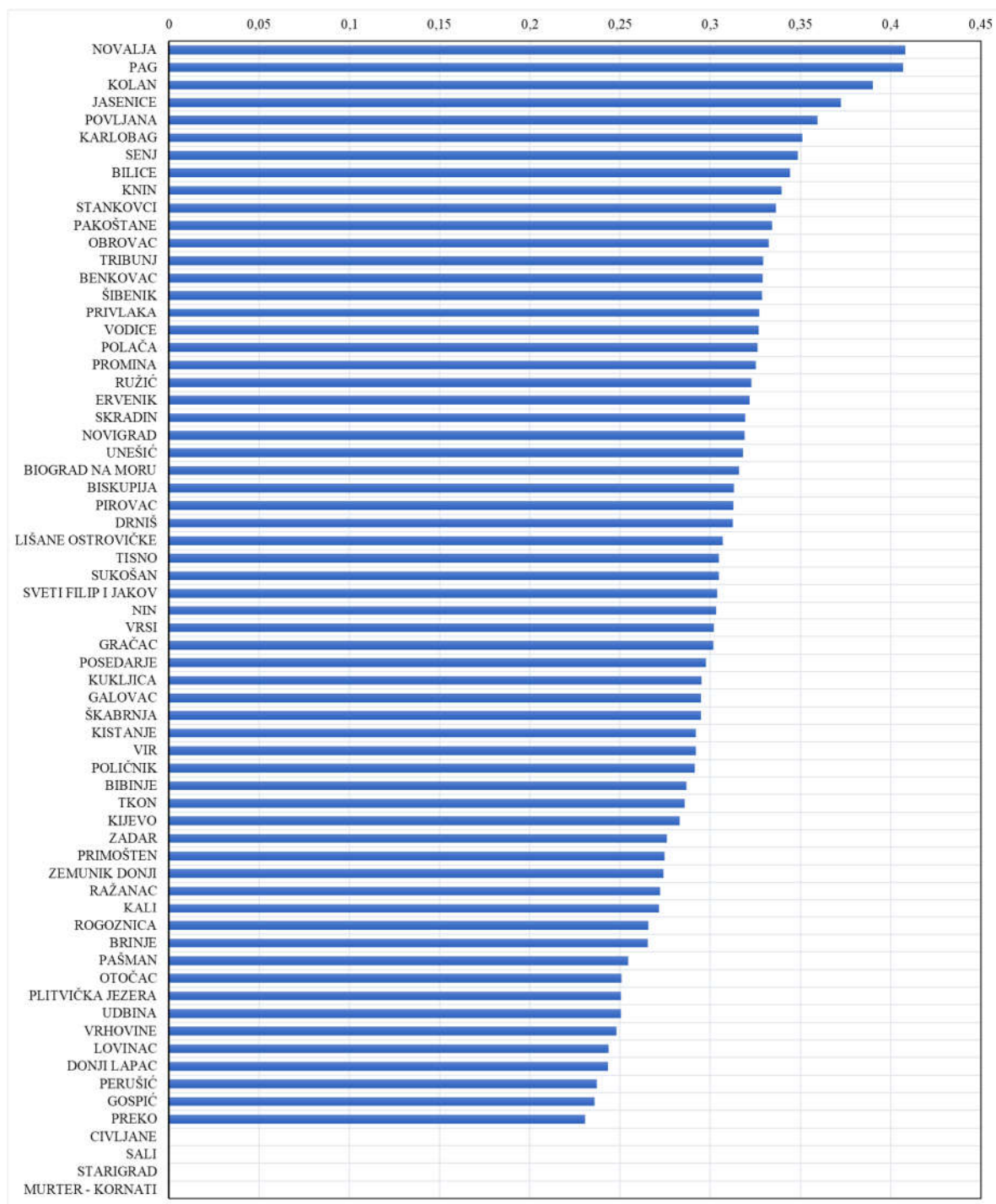
Slika 37. Prikaz razdiobe pogodnosti za izgradnju vjetroelektrana na predmetnom području

Na slici 37 je prikan rasap pogodnosti za izradnju vjetroelektrana na području Ličko-senjske županije, Zadarske županije te Šibensko-kninske županije. Po histogramu je vidljivo da maksimalna dobivena vrijednost iznosi 0,62, dok najviše prevladavaju vrijednosti unutar intervala 0,30-0,35. To ukazuje na činjenicu da ne postoje lokacije u sve tri županije koje zadovoljavaju sve kriterije u potpunosti, odnosno većina područja unutar tih triju županija je ocijenjena kao nepogodna za izgradnju vjetroelektrana, uzevši u obzir sve navedene kriterije.



Slika 38. Prikaz pogodnosti za izgradnju vjetroelektrana za svaku županiju

Za navedeno područje određene su prosječne vrijednosti po županijama unutar područja od interesa. Iz slike 38 je vidljivo da najviše lokacija pogodnih za izgradnju vjetroelektrana ima Šibensko-kninska županija.

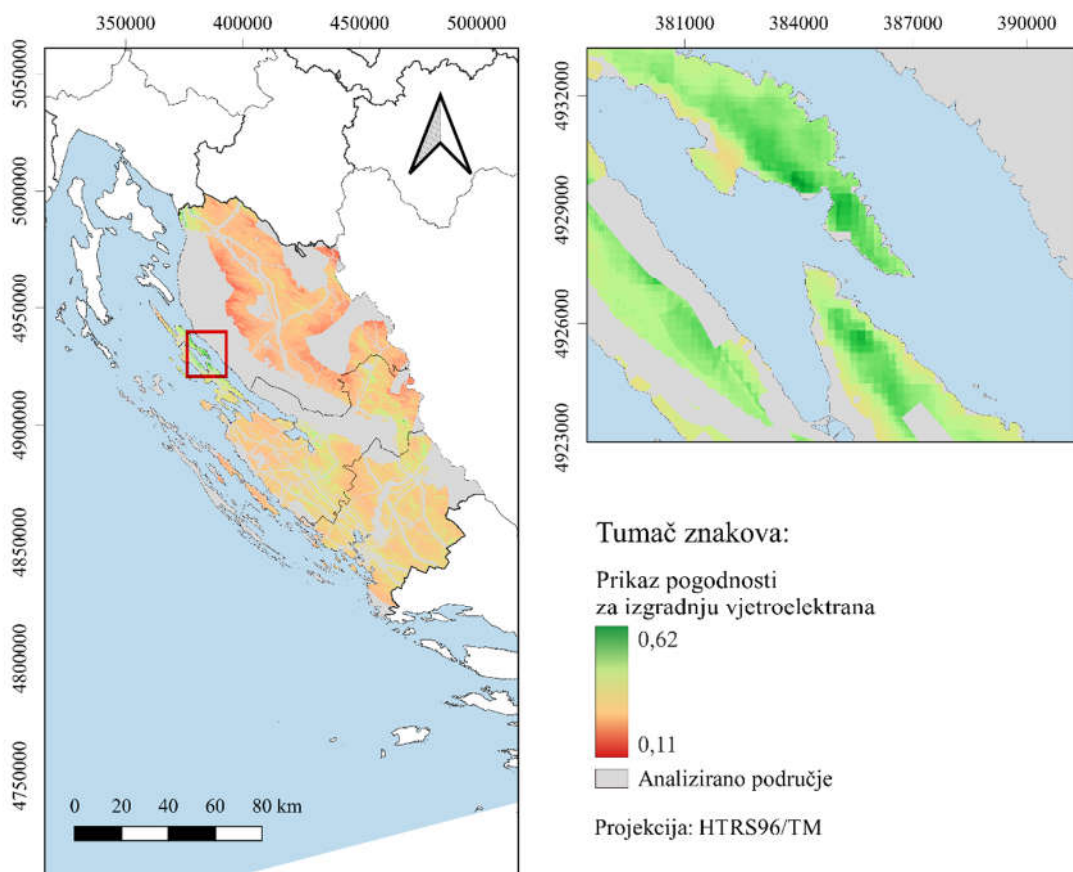


Slika 39. Prikaz pogodnosti za izgradnju vjetroelektrana za svaku općinu

Nadalje, nakon prikaza po županijama, izrađen je prikaz pogodnosti za svaku općinu unutar područja od interesa, na temelju srednjih vrijednosti. Iz slike 39 proizlazi da općine Novalja i Pag imaju najviše vjetropotencijala u odnosu na ostale općine. S druge strane, općine Cijlpane, Sali, Starigrad te Murter-Kornati, uzevši u obzir sve kriterije, nemaju nikakav potencijal za izgradnju vjetroelektrana.

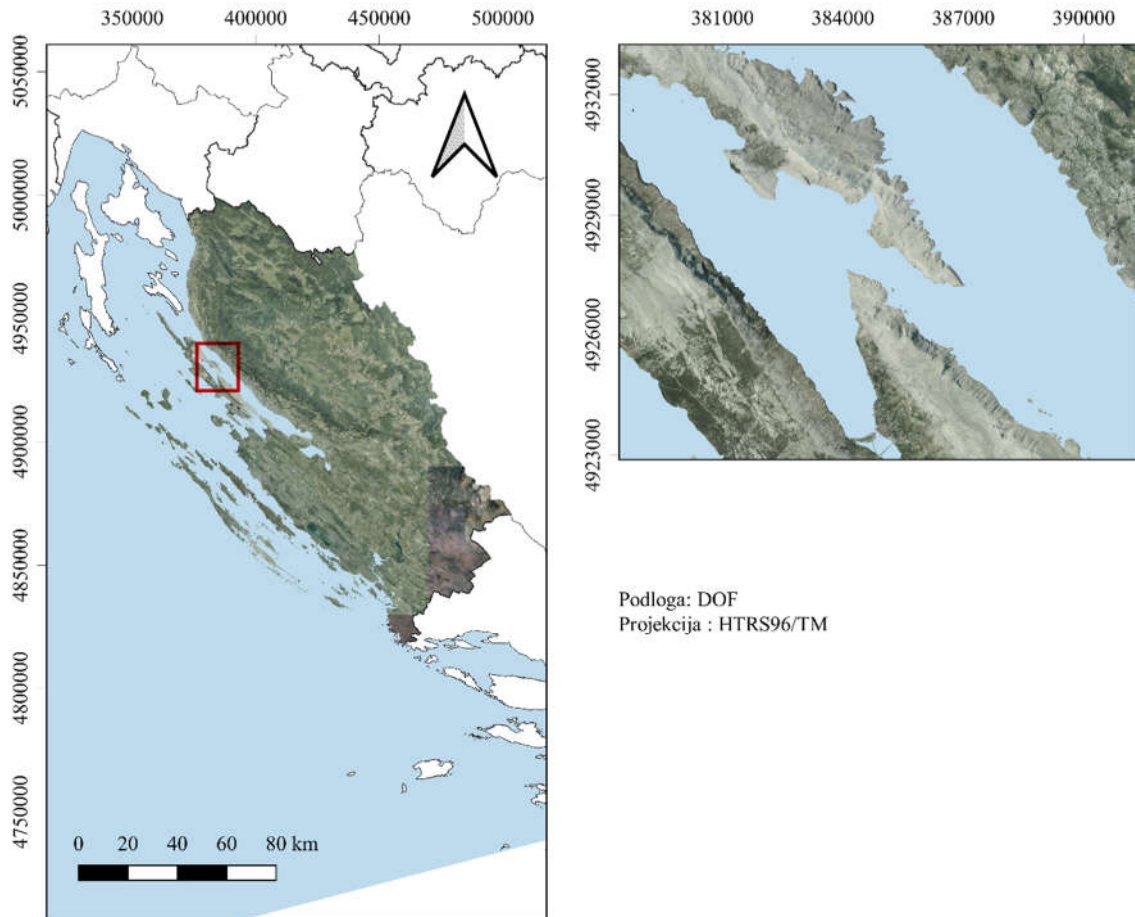
6.3. ODABIR NAJBOLJE LOKACIJE ZA IZGRADNJU VJETROELEKTRANA

Dio istraživanja je obuhvaćao pronalazak najbolje lokacije unutar analiziranog područja koja se može ponuditi za izgradnju vjetroelektrane. Koristeći „raster calculator“ izdvojeno je područje koje sadrži maksimalnu vrijednost.



Slika 40. Prikaz optimalne lokacije

Na slici 40 je prikazana optimalna lokacija za izgradnju vjetroelektrana, radi se o otoku Pagu, južnom dijelu općine Novalja. Kada je pronađena lokacija, učitani su DOF5 kako bi se procijenila spomenuta lokacija.

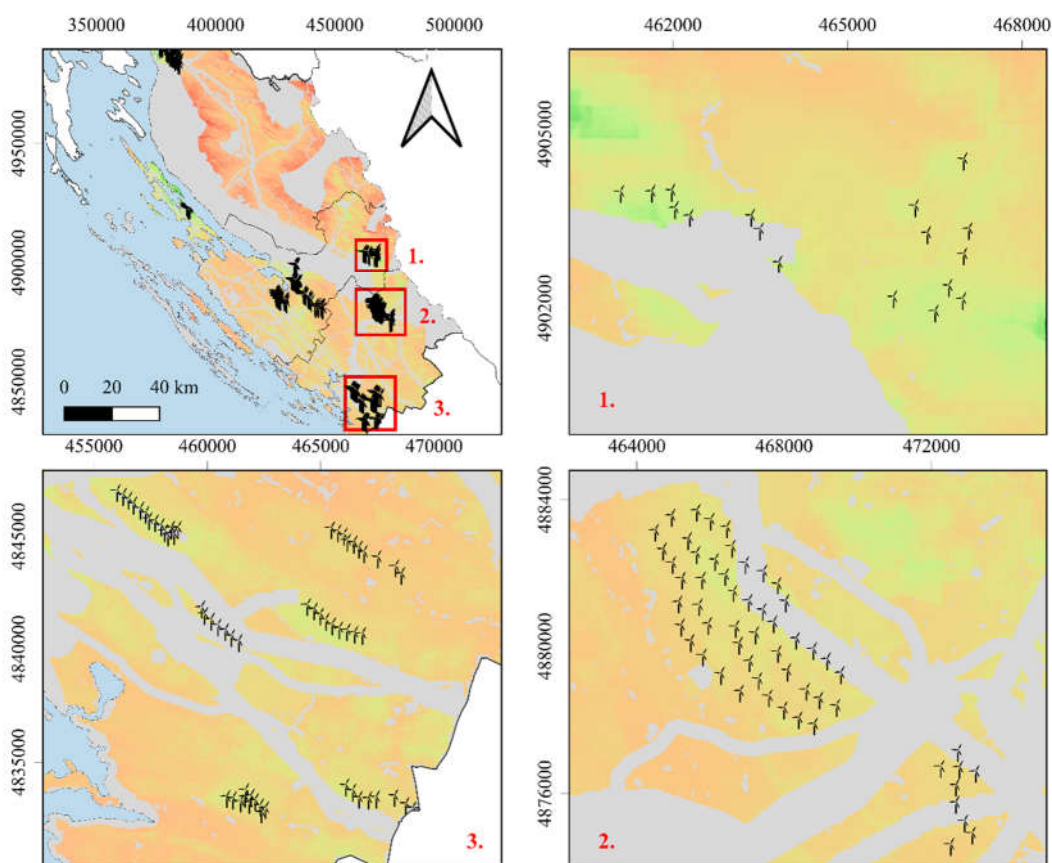


Slika 41. Prikaz optimalne lokacije sa DOF5

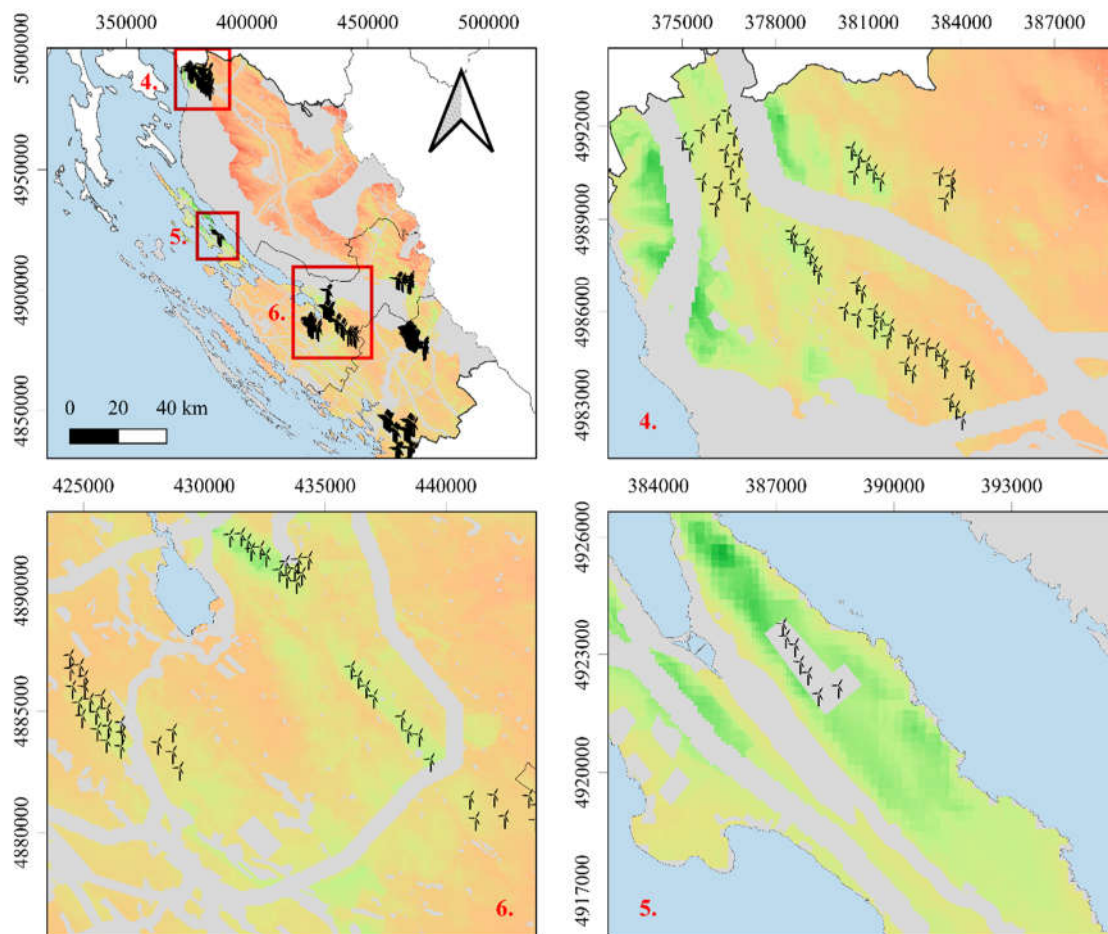
Slika 41 prikazuje spomenuto područje, te se može zaključiti da se radi o povoljnoj lokaciji za izgradnju vjetroelektrane, radi se, naime, o nenaseljenom području niske vegetacije, sa velikom brzinom i gustoćom vjetra, niskog nagiba, te se u blizini nalazi postojeća vjetroelektrana Ravne I, što olakšava potrebu za priključenje na postojeću elektroenergetsku mrežu i cestovnu infrastrukturu.

6.4. USPOREDBA DOBIVENIH REZULTATA S POSTOJEĆIM VJETROELEKTRANAMA

Posljednji dio provedenog znanstvenog istraživanja je bio usporedba dobivenih rezultata sa već postojećim vjetroelektranama. Na slikama 42 i 43 je prikazano postojeće stanje vjetroelektrana, koje se nalaze na analiziranom području. Podaci o vjetroelektranama su preuzeti sa web stranica OpenStreetMap. Vizualnim uspoređivanjem stvarnog stanja i dobivenih rezultata, vidljivo je da se već postojeće vjetroelektrane nalaze na područjima koje su ocijenjene kao pogodnija za izgradnju, što ukazuje na činjenicu da je multikriterijska analiza bila uspješna, te da su uspješno određeni težinski koeficijenti.



Slika 42. Prikaz postojećih vjetroelektrana u odnosu na pogodnost za izgradnju
vjetroelektrana



Slika 43. Prikaz postojećih vjetroelektrana u odnosu na pogodnost za izgradnju vjetroelektrana

7. RASPRAVA

Provedeno istraživanje i prikupljeni podaci u današnje vrijeme vrlo su relevantni s obzirom na postepeni prijelaz na obnovljive izvore energije. Upravo iz tog razloga potrebno je razvijati alate, metode i vještine kojima bi se olakšao odabir povoljnih lokacija.

Pregledom literature utvrđeno je da je vjetar jedan od najboljih izvora energije te je problematika izgradnje vjetroelektrana obrađena u mnogim državama diljem svijeta. Vjetroelektrane ne proizvode nikakve štetne tvari i ne ometaju okolinu zbog buke, a vjetar je neiscrpan izvor energije koji nam je gotovo svakodnevno dostupan. Također, bitno je napomenuti kako vrhunac proizvodnje, na našem području postiže u zimskim mjesecima, što je suprotno od fotonaponskih elektrana koje vrhunac proizvodnje bilježe u ljetnim mjesecima. Također, sličan proces odvija se i u toku jednoga dana budući da vjetroelektrane, u pravilu, vrhunac postižu noću, a fotonaponske elektrane danju. Ovakav raspored je povoljan i znatno olakšava vođenje elektroenergetskog sustava jer se smanjuju ekstremi. Osim pozitivnog utjecaja na okoliš, tako proizvedena energija donosi sigurnost, prije svega energetske siromašnim državama, a onda i pojedincu. Tome doprinosi činjenica da su obnovljivi izvori energije široko dostupni te imaju nisku cijenu.

Proučavanjem radova slične tematike utvrđeno je da nisu korišteni jedinstveni kriteriji za sve parametre, već oni variraju. Može se zaključiti da svako područje ima svoje karakteristike koje su uzete u obzir kako bi se moglo na ispravan način analizirati područje i odrediti najpovoljnije lokacije za izgradnju vjetroelektrana. Također, u radovima koji su konzultirani primijenjeno je klasificiranje parametara u određeni broj klasa što dovodi do manje preciznosti kod donošenja konačne odluke. Uočeni problem riješen je koristeći metodu normaliziranja vrijednosti što ne dovodi do gubitka podataka uvjetovanog njihovim spajanjem u zajedničke klase zadanih granica.

Iz provedenog istraživanja te iz pozicija već izgrađenih vjetroelektrana, može se zaključiti da se najpovoljnije lokacije za izgradnju vjetroelektrana u Hrvatskoj nalaze na udaljenim, ruralnim, brdovitim područjima na koje nailazi profilirana struja zraka nedaleko od planinskih masiva ili na samim planinskim masivima. Pozicioniranje turbine na vrhu brda ili planina poželjno je jer se tamo postižu najveće brzine vjetra, dovoljne za ostvarivanje nazivne snage vjetroturbina. Jasno je da se većina takvih područja nalazi u Dalmaciji i Dalmatinskoj zagori, gdje su se izdigli planinski masivi u sastavu Dinarida poput Velebita, Dinare, Kamešnice, itd., koji svojim položajem uzrokuju snažan vjetar – buru (Biloš, 2020).

Na temelju ovoga rada mogu se jasno odrediti područja koja su optimalna za izgradnju vjetroelektrana. Potvrda ove teze sadržana je u činjenici da se postojeće vjetroelektrane nalaze upravo na najpogodnijim područjima određenima ovom analizom što znači da su kriteriji, potkriteriji te njihove težine ispravno postavljeni.

8. ZAKLJUČAK

Zbog velikog potencijala energije vjetra na području Republike Hrvatske krenulo se u sve veći razvoj vjetroelektrana. Odabir najpovoljnijih lokacija za izgradnju vjetroelektrana je zahtjevan proces jer je potrebno uskladiti velik broj kriterija koji su najčešće u konfliktu.

Kako bi se riješila navedena problematika prikupljene su različite vrste podataka s naglaskom na činjenicu da se radi o otvorenim podacima, dostupnima za upotrebu bez komercijalnih ograničenja. Takav pristup ovaj rad čini primjenjivim neovisno o lokaciji i financijskim kapacitetima izrađivača.

Čimbenici koji utječu na odabir podijeljeni su u 3 skupine kriterija: ekonomski ekološki i društveni. Postavljeni su isključivi kriteriji kao što su minimalna udaljenost od cesta, naselja, zaštićenih dijelova prirode, željeznica i dr. koji su uvjetovani zakonskim odredbama i preporukama. Preuzeta je klasifikacija terena da bi se odredilo što spada u izgrađeno tlo, golo tlo, vegetaciju i vode te je nakon toga provedena reklasifikacija.

Za određivanje najpovoljnijih lokacija potrebno je sve navedene kriterije uzeti u obzir jer je pregledom dosadašnjih radova vidljivo da ne postoje ujednačeni kriteriji za odabir optimalnih lokacija. Svi kriteriji međusobno su uspoređeni te su na temelju važnosti kriterija dodijeljeni težinski koeficijenti. U stručnoj literaturi navedeni postupak naziva se AHP metoda odlučivanja. Za svaki od odabranih kriterija izrađen je raster pogodnosti te su oni na kraju preklapljeni. Nakon preklapanja dobiven je rezultat s kontinuiranim vrijednostima pogodnosti za izgradnju vjetroelektrana.

Ovim radom dan je uvid u mogućnosti korištenja GIS-a u elektroenergetskom planiranju, a sve koristeći software otvorenog koda i podatke dostupne za slobodnu uporabu. Vrijednost rada ogleda se u njegovoj širokoj primjenjivosti na rješavanje ovog ili sličnog problema neovisno o

lokaciji. Područje geodezije i geoinformatike dobiva na značaju u uvjetima industrijske tranzicije te se ovakvim radom otvaraju mogućnosti interdisciplinarne suradnje sa ostalim strukama. Poslovne prilike su svakodnevne i uz dozu kreativnosti kompleksni problem može se na zadovoljavajući način riješiti široko dostupnim alatima, metodama i podacima.

ZAHVALA

Zahvaljujemo se mentoru izv. prof. dr. sc. Mateu Gašparoviću na pruženoj prilici, pomoći i utrošenom vremenu prilikom izrade ovoga rada. Svojim stručnim savjetima, idejama i poticanjima potaknuo nas je na daljnje proučavanje ovoga područja i usavršavanje znanja.

POPIS LITERATURE

Ayodele, T.R., Ogunjuyigbe, A.S.O., Odigie O., Munda J.L. (2018): A multi-criteria GIS based model for wind farm site selection using interval type-2 fuzzy analytic hierarchy process: The case study of Nigeria.

Ali, Y., Butt, M., Sabir, M., Mumtaz, U., Salman, A. (2017): Selection of suitable site in Pakistan for wind power plant installation using analytic hierarchy process (AHP).

Biloš, J. (2020): Razvoj projekta vjetroelektrane u tržišnim uvjetima, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje.

Gašparović, I., Gašparović, M. (2019). Determining Optimal Solar Power Plant Locations Based on Remote Sensing and GIS Methods: A Case Study from Croatia. Remote Sensing, 11(12), 1481. MDPI AG. Pristupljeno <http://dx.doi.org/10.3390/rs11121481>.

Horvat, A. (2019): Potencijal iskorištavanja energije vjetra u Splitsko-dalmatinskoj županiji, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno- matematički fakultet.

Konstantinos, I., Georgios, T., Garyfalos, A. (2019): A Decision Support System methodology for selecting wind farm installation locations using AHP and TOPSIS: Case study in Eastern Macedonia and Thrace region, Greece.

Štefulj, A. (2015). Vjetroelektrane, Završni rad, Sveučilište u Rijeci, Filozofski fakultet.

MREŽNE ADRESE

URL 1: Vjetroelektrane u Hrvatskoj,

https://hr.wikipedia.org/wiki/Vjetroelektrane_u_Hrvatskoj, (17.06.2022.).

URL 2: Godišnji izvještaj o proizvodnji vjetroelektrana u Hrvatskoj,

<https://www.hops.hr/page-file/fpgRxv2qoKU9z5SH07Q0p6/izvjestaji-o-proizvodnji-ve-u-rh/HOPS%20-%20Godi%C5%A1nji%20izvje%C5%A1taj%20o%20proizvodnji%20VE%20u%20HR%20za%202021.pdf>, (17.06.2022.).

URL 3: Global Wind Atlas, <https://globalwindatlas.info/area/Croatia?download=print>,

(17.06.2022.).

URL 4: DEM, <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem/eu-dem-v1.1?tab=download&selected:list=dem-v1-1-e40n20>,

(17.06.2022.).

URL 5: Multikriterijska analiza, http://eprints.lse.ac.uk/12761/1/Multi-criteria_Analysis.pdf,

(17.06.2022.).

URL 6: Thomas L. Saaty, https://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_L._Saaty, (17.06.2022.)

URL 7: Overpass turbo, <https://overpass-turbo.eu/>, (17.06.2022.)

URL 8: Elektroenergetska infrastruktura, <https://registri.nipp.hr/izvori/view.php?id=1195>,

(17.06.2022.).

URL 9: Corine Land Cover, <https://registri.nipp.hr/izvori/view.php?id=477>, (17.06.2022.).

URL 10: Naselja, <https://registri.nipp.hr/izvori/view.php?id=244>, (17.06.2022.).

URL 11: Zaštićena područja, <http://services.bioportal.hr/wfs>, (17.06.2022.).

URL 12: DOF5, <https://registri.nipp.hr/izvori/view.php?id=504>, (17.06.2022.).

URL 13: QGIS - The Leading Open Source Desktop GIS,
<http://www.qgis.org/en/site/about/index.html>, (17.06.2022.).

URL 14: GRASS GIS, <https://www.osgeo.org/projects/grass-gis/>, (17.06.2022.).

URL 15: Excel, <https://products.office.com/hr-hr/excel>, (17.06.2022.).

POPIS SLIKA

Slika 1. <i>Vjetroagregat Charlesa F. Brusha (Štefulj, 2015)</i>	3
Slika 2. <i>Moderni vjetroagregat (Štefulj, 2015)</i>	3
Slika 3. <i>Vremenska dinamika izgradnje vjetroelektrana u Republici Hrvatskoj (URL 2)</i>	12
Slika 4. <i>Lokacije postojećih vjetroelektrana (URL 2)</i>	13
Slika 5. <i>Sučelje portala "Global Wind Atlas"</i>	14
Slika 6. <i>"Overpass Turbo"</i>	15
Slika 7. <i>Hijerarhijski odnos kriterija</i>	24
Slika 8. <i>Prikaz pogodnosti u odnosu na brzinu vjetra</i>	30
Slika 9. <i>Prikaz razdiobe pogodnosti u odnosu na brzinu vjetra (Napomena: apscisa-vrijednost pogodnosti; ordinata-frekvencija pogodnosti)</i>	31
Slika 10. <i>Prikaz pogodnosti u odnosu na gustoću vjetra</i>	31
Slika 11. <i>Prikaz razdiobe pogodnosti u odnosu na gustoću vjetra</i>	32
Slika 12. <i>Prikaz pogodnosti u odnosu na nagib terena</i>	32
Slika 13. <i>Prikaz razdiobe pogodnosti u odnosu na nagib terena</i>	33
Slika 14. <i>Prikaz pogodnosti u odnosu na elektroenergetsku infrastrukturu</i>	33
Slika 15. <i>Prikaz razdiobe pogodnosti u odnosu na elektroenergetsku infrastrukturu</i>	34
Slika 16. <i>Prikaz pogodnosti u odnosu na cestovnu infrastrukturu</i>	35

Slika 17. <i>Prikaz razdiobe pogodnosti u odnosu na cestovnu infrastrukturu</i>	35
Slika 18. <i>Prikaz pogodnosti u odnosu na pokrov zemljišta</i>	36
Slika 19. <i>Prikaz razdiobe pogodnosti u odnosu na pokrov zemljišta</i>	37
Slika 20. <i>Prikaz pogodnosti u odnosu na zaštićena područja</i>	37
Slika 21. <i>Prikaz razdiobe pogodnosti u odnosu na zaštićena područja</i>	38
Slika 22. <i>Prikaz pogodnosti u odnosu na vodene površine</i>	38
Slika 23. <i>Prikaz razdiobe pogodnosti u odnosu na vodene površine</i>	39
Slika 24. <i>Prikaz pogodnosti u odnosu na naseljena područja</i>	40
Slika 25. <i>Prikaz razdiobe pogodnosti u odnosu na naseljena područja</i>	41
Slika 26. <i>Prikaz pogodnosti u odnosu na zračne luke</i>	41
Slika 27. <i>Prikaz razdiobe pogodnosti u odnosu na zračne luke</i>	42
Slika 28. <i>Prikaz pogodnosti u odnosu na željezničku infrastrukturu</i>	42
Slika 29. <i>Prikaz razdiobe pogodnosti u odnosu na željezničku infrastrukturu</i>	43
Slika 30. <i>Prikaz pogodnosti u odnosu na ekonomske kriterije</i>	44
Slika 31. <i>Prikaz razdiobe pogodnosti u odnosu na ekonomske kriterije</i>	45
Slika 32. <i>Prikaz pogodnosti u odnosu na ekološke kriterije</i>	45
Slika 33. <i>Prikaz razdiobe pogodnosti u odnosu na ekološke kriterije</i>	46
Slika 34. <i>Prikaz pogodnosti u odnosu na društvene kriterije</i>	46

Slika 35. <i>Prikaz razdiobe pogodnosti u odnosu na društvene kriterije</i>	47
Slika 36. <i>Prikaz pogodnosti za izgradnju vjetroelektrana na predmetnom području.....</i>	48
Slika 37. <i>Prikaz razdiobe pogodnosti za izgradnju vjetroelektrana na predmetnom području</i>	49
Slika 38. <i>Prikaz pogodnosti za izgradnju vjetroelektrana za svaku županiju.....</i>	49
Slika 39. <i>Prikaz pogodnosti za izgradnju vjetroelektrana za svaku općinu.....</i>	50
Slika 40. <i>Prikaz optimalne lokacije.....</i>	51
Slika 41. <i>Prikaz optimalne lokacije sa DOF5</i>	52
Slika 42. <i>Prikaz postojećih vjetroelektrana u odnosu na pogodnost za izgradnju vjetroelektrana</i>	53
Slika 43. <i>Prikaz postojećih vjetroelektrana u odnosu na pogodnost za izgradnju vjetroelektrana</i>	54

POPIS TABLICA

Tablica 1. <i>Kriteriji korišteni u analiziranim radovima</i>	6
Tablica 2. <i>Popis izgrađenih vjetroelektrana na predmetnom području (URL 1)</i>	9
Tablica 3. <i>"Key- value"</i>	16
Tablica 4. <i>Saatyeva skala</i>	25
Tablica 5. <i>Matrica omjera glavnih kriterija</i>	25
Tablica 6. <i>Normalizirana matrica omjera s pripadnim težinskim koeficijentima</i>	26
Tablica 7. <i>Podkriteriji ekonomskog kriterija – normalizirana matrica omjera sa pripadnim težinskim koeficijentima</i>	27
Tablica 8. <i>Podkriteriji ekološkog kriterija – normalizirana matrica omjera sa pripadnim težinskim koeficijentima</i>	27
Tablica 9. <i>Podkriteriji društvenog kriterija – normalizirana matrica omjera sa pripadnim težinskim koeficijentima</i>	28

Razvoj metodologije za određivanje optimalne lokacije za izgradnju vjetroelektrana

Luka Družević, Karlo Zaplatić, Dino Žigulić

SAŽETAK

Iskorištavanje obnovljivih izvora energije pa tako i energije vjetra jedno je od važnijih pitanja današnjice. Zbog problema globalnog zatopljenja i nedostatka energenata za normalno funkcioniranje društva sve veći broj država razvija nove energetske politike kojima se nastoje okrenuti prema proizvodnji energije iz ekološki prihvatljivih izvora. Republika Hrvatska ima veliki potencijal energije vjetra koji je djelomično iskorišten, ali još uvijek ima prostora za proširenje proizvodnje. Ovim istraživanjem opisana je i detaljno postavljena te razvijena metodologija odabira najpovoljnijih lokacija za izgradnju vjetroelektrana. Područje koje je izabrano za analizu su Ličko-senjska, Zadarska i Šibensko-kninska županija. Ovo područje karakteriziraju brdovita područja te prisutnost planinskih masiva što je jedan od najbitnijih čimbenika za postizanje najveće brzine vjetra. U svrhu istraživanja u obzir je uzet niz kriterija koji su podijeljeni u tri glavne skupine. To su ekonomski, ekološki i društveni kriteriji. Koristeći AHP metodu odlučivanja svakome kriteriju, kako makrokriteriju tako i podkriteriju, dodijeljene su odgovarajuće težine s obzirom na važnost kriterija. Nakon provedene analize dobiven je raster pogodnosti te je na njemu odabrana najbolja lokacija za izgradnju vjetroelektrane. Uz najbolju lokaciju također su prikazane i lokacije već postojećih vjetroelektrana čime je izvršena samokontrola odabira kriterija te postavljanja težina.

Ključne riječi: vjetroelektrane, energija vjetra, AHP, optimalna lokacija

Methodology development for determining the optimal location for the construction of wind farms

Luka Družević, Karlo Zaplatić, Dino Žigulić

ABSTRACT

The use of renewable energy sources, including wind energy, is one of the most important issues today. Due to the problem of global warming and lack of energy for the normal functioning of society and increasing number of countries are developing new energy policies that seek to turn to energy production from environmentally friendly sources. The Republic of Croatia has great potential for wind, which has been partially used, but there is still room for expansion. This research describes and sets out in detail and elaborates the methodology of selecting the most favourable locations for the construction of wind farms. Areas selected for analysis are in Lika-Senj, Zadar and Šibenik-Knin county. These areas are characterized by mountainous areas and the presence of mountain massifs, which is one of the most important factors for achieving the highest wind speed. For the research, there were several numbers of criteria taken into account, and they were divided into three main groups: economic, environmental, and social criteria. Using the AHP decision-making method, appropriate weights were assigned to each criteria, both macro-criteria, and sub-criteria, given the importance of criteria itself. After the analysis, raster benefits were obtained and the best location for the construction of wind farms was selected. In addition to the best location, the locations of already existing wind farms are also shown, thus performing self-control of the selection of criteria and weight setting.

Key words: wind farms, wind energy, AHP, optimal location