Interreg Italia-Slovenija
Karst Firewall 5.0

Cofinanziato dall'Unione europea
Sofinancira Evropska unija

OCENA NEVARNOSTI IN RANLJIVOSTI ZARADI POŽAROV V NARAVI OB PODNEBNIH SPREMEMBAH NA KRAŠKEM OBMOČJU

KARST FIREWALL 5.0

Adattamento innovativo al cambiamento climatico basato sugli ecosistemi nella regione del Carso. Promuovere una silvicoltura resistente agli incendi con il supporto di Industria 5.0

Inovativno ekosistemsko-zasnovano prilagajanje podnebnim spremembam na Krasu. Spodbujanje požarno odporne gmajne s podporo industrije 5.0

Il progetto Karst Firewall 5.0 è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia.
Projekt Karst Firewall 5.0 sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.
www.ita-slo.eu/karst-firewall-50

DELIVERABLE INFORMAZIONI / INFORMACIJE	
Acronimo del progetto / Akronim projekta:	**KARST FIREWALL 5.0**
Titolo del progetto / Naslov projekta:	**Adattamento innovativo al cambiamento climatico basato sugli ecosistemi nella regione del Carso. Promuovere una silvicoltura resistente agli incendi con il supporto di Industria 5.0** **Inovativno ekosistemsko-zasnovano prilagajanje podnebnim spremembam na Krasu. Spodbujanje požarno odporne gmajne s podporo industrije 5.0**
Area prioritaria / Prednostno področje:	**Un'Europa più verde e a basse emissioni di carbonio, che si muove verso un'economia a zero emissioni di carbonio e resiliente** **Bolj zelena, nizkoogljična Evropa, ki prehaja na gospodarstvo z ničelno stopnjo neto emisij ogljika in je odporna**
Obiettivo specifico del programma / Specifični cilj programa:	**SO4: Promuovere l'adattamento ai cambiamenti climatici e la prevenzione del rischio di catastrofi e la resilienza, tenendo conto degli approcci ecosistemici.** **SO4: Spodbujanje prilagajanja podnebnim spremembam in preprečevanja tveganja nesreč ter odpornosti ob upoštevanju ekosistemskih pristopov**
URL del sito web del progetto / URL spletne strani projekta:	www.ita-slo.eu/karst-firewall-50
Numero del documento / Številka dokumenta:	KFW50-D112
Titolo del documento / Naslov dokumenta:	OCENA NEVARNOSTI IN RANLJIVOSTI ZARADI POŽAROV V NARAVI OB PODNEBNIH SPREMEMBAH NA KRAŠKEM OBMOČJU
Work Package:	1
Attività / Aktivnost:	1.2
Partner responsabili (autori) / Odgovorni partnerji (avtorji):	IUAV Università di Venezia (Granceri Bradaschia, Massimiliano; Morassutti, Giacomo; Pintarič, Domen; Longato, Davide; Maragno, Denis; Musco, Francesco); ZRC-SAZU (Čonč, Špela; Breg Valjavec, Mateja; Ciglič, Rok)
Citazione / Citiranje:	Granceri Bradaschia M., Čonč Š., Morassutti G., Breg M., Longato D., Pintarič D., Ciglič R., Maragno D., Musco F., 2025, "VALUTAZIONE DEL PERICOLO E DELLA VULNERABILITÀ AGLI INCENDI BOSCHIVI SUL CARSO E L'IMPATTO DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO / OCENA NEVARNOSTI IN RANLJIVOSTI ZARADI POŽAROV V NARAVI OB PODNEBNIH SPREMEMBAH NA KRAŠKEM OBMOČJU", Karst Firewall 5.0 project, EU Interreg Italia Slovenia, 10.5281/zenodo.18220789
Luogo e data di pubblicazione / Kraj in datum objave:	Trst, 10/10/2025

KAZALO

1 UVOD 4

1.1 Projekt Karst Firewall 5.0 4

2 PREUČEVANO OBMOČJE 7

3 MATERIALI IN METODE 8

3.1 Pojasnjevalne spremenljivke 8

3.2 Točke vžiga požarov v naravi 13

3.3 Analiza verjetnosti požarne nevarnosti z MaxEnt modeliranjem 14

3.4 MCDA/AHP pristop za analizo požarne ranljivosti 16

4 REZULTATI IN DISKUSIJA 22

4.2 Analiza požarne ranljivosti 30

4.3 Prostorske ugotovitve o točkih vžiga požarov v naravi in preverjanje točnosti zemljevidov nevarnosti in ranljivost 33

4.4 Poudarki in ugotovitve iz analiz nevarnosti in ranljivosti zaradi požarov v naravi 38

5 ZAKLJUČKI 40

6 VIRI 42

Interreg
Italia-Slovenija
Karst Firewall 5.0

Cofinanziato dall'Unione europea
Sofinancira Evropska unija

Il progetto Karst Firewall 5.0 è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia.
Projekt Karst Firewall 5.0 sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.

www.ita-slo.eu/karst-firewall-50

1 UVOD

1.1 Projekt Karst Firewall 5.0

Podnebne spremembe vplivajo na požarni režim na Krasu. Zaradi globalnega segrevanja bodo požari v naravi verjetno postali pogostejši in hujši (Dupuy et al., 2020). Sedanje strategije gašenja in upravljanja požarov postajajo manj učinkovite, zato so potrebni novi prilagoditveni pristopi. Projekt Karst Firewall 5.0 obravnava dva izziva na programskem območju: požare v naravi in upravljanje požarov v naravi. Za njuno reševanje namerava razviti inovativne akcijske načrte za ohranitev zdravega čezmejnega območja Krasa/Carso in povečanje njegove odpornosti z mislijo na prihodnost. Glede na čezmejne značilnosti študijskega območja v kraški pokrajini med Italijo in Slovenijo je ključno spodbujati čezmejno sodelovanje med obema državama, da bi obravnavali nujno potrebo po zmanjšanju tveganja požarov v naravi in razvoju strategij pravočasnega odzivanja, kar se je pokazalo ob velikem požaru poleti leta 2022.

Namen projekta je pripraviti podlago za boljši dialog in sodelovanje ne le med akterji, ki so neposredno vključeni v upravljanje in izvajanje strategij odzivanja na požare v naravi na obeh straneh meje, temveč tudi med akterji iz različnih sektorjev in širšo skupnostjo, ki so na nek način prizadeti zaradi posledic požarov v naravi. Na ta način bi lahko bil projekt Karst Firewall 5.0 resnično koristen pri razvoju učinkovitega čezmejnega mehanizma za preprečevanje in obvladovanje požarov v naravi, saj imajo vsi vključeni akterji, od posameznih državljanov in uporabnikov zemljišč do odločevalcev na visoki ravni, pri tem cilju zelo pomembno in dopolnilno vlogo.

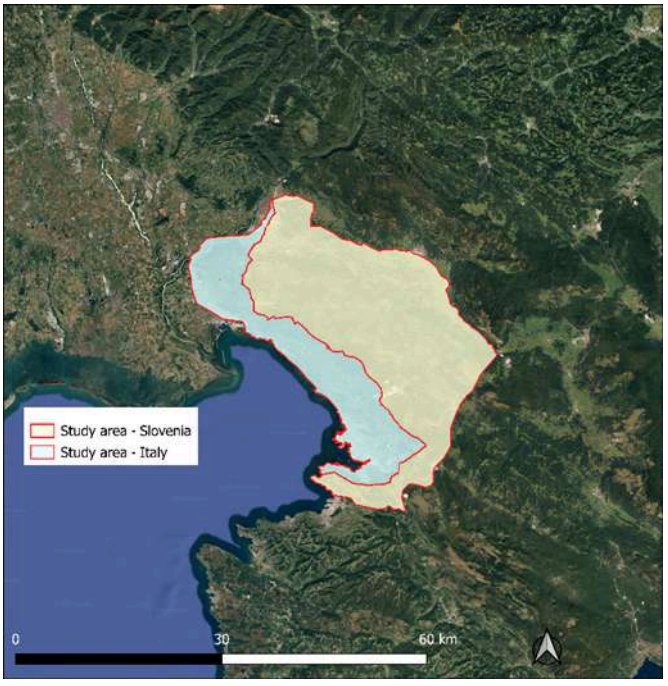
Delovni sklop 1, ki se imenuje »Kako narediti Kras manj vnetljiv: konceptualni okvir za zmanjšanje tveganja čezmejnih kraških požarov«, je namenjen razvoju konceptualnega okvira za spodbujanje zmanjšanja tveganja požarov v naravi z vzpostavitvijo čezmejnega sodelovanja za učinkovito in prilagodljivo upravljanje požarov v naravi na kraških območjih. To vključuje izdelavo zemljevidov verjetnosti nevarnosti in ranljivosti zaradi požarov v naravi na projektnem območju. Cilj je osredotočiti se na vpliv prihodnjih podnebnih napovedi na režime požarov v naravi na čezmejnem območju Krasa/Carso. V ta namen sta bila izbrana dva skupna pristopa, in sicer **modeliranje na podlagi maksimalne entropije (MaxEnt) za analizo verjetnosti nevarnosti požarov v naravi** in **analiza večkriterijskih odločitev (MCDA, AHP) za analizo ranljivosti požarov v naravi**.

Modeliranje na podlagi Maxenta je zaradi svoje relativne preprostosti postalo zelo priljubljeno in se pogosto uporablja, zlasti na področjih ekologije in biogeografije (Phillips et al., 2006). Uporaba metod ekološkega modeliranja, kot so MaxEnt, posplošeni linearni modeli (ang. *Generalised linear models*; GLM) ali posplošeni aditivni modeli (ang. *Generalised additive* models; GAM), se je že izkazala za uspešno tudi na drugih znanstvenih področjih (npr. naravne nesreče, geografija) za napovedovanje prostorske porazdelitve naravnih pojavov in razumevanje prostorskih vzorcev naravnih procesov. Modeliranje MaxEnt je bilo npr. uporabljeno za napovedovanje prostorske razporeditve jam, kar lahko pomaga pri določanju območij v pokrajini, ki so kritična za pretok v kraškem sistemu podzemne vode (Blitch et al., 2023). V zadnjih letih je bil MaxEnt uspešno uporabljen tudi za oceno požarne ogroženosti, tveganja in verjetnosti v različnih okoljih in je v primerjalnih študijah presegel metode naključnega gozda (ang. *Random forest*) in modeliranje na podlagi GLM (Kim et al., 2019; Mishra et al., 2023; Paudel et al., 2024; Vilar et al., 2016; Yang et al., 2021).

Izdelava karte požarne ogroženosti zahteva oceno številnih različnih dejavnikov. Ker so dejavniki heterogeni in ima vsak določeno stopnjo relativne pomembnosti in se merijo svoj relativni pomen in mersko enoto, je bil za opredelitev območij z večjo/manjšo ranljivostjo izbran prostorsko-eksplicitni GIS-ovski pristop večkriterijske analize odločanja (MCDA) (Malczewski, 2006). V okviru izvedene MCDA je bila za dodelitev uteži, ki prikazujejo relativno pomembnost med izbranimi dejavniki, uporabljena metoda analitičnega hierarhičnega procesa (AHP), ki je ena najpogosteje uporabljenih metod za oceno relativne pomembnosti vseh analiziranih dejavnikov (Gigović in Jakovljević, 2018; Goleiji et al., 2017; Maniatis et al., 2022; Sivrikaya in Küçük, 2022). AHP je prvi teoretično utemeljil Saaty (2002) za primerjavo meril v MCDA in zagotavljanje matematično utemeljene metode za količinsko opredelitev subjektivnih ocen relativne pomembnosti.

2 PREUČEVANO OBMOČJE

Območje raziskave zajema zgodovinsko-geografsko območje planote Kras/Carso (Carso v Italiji in Kras v Sloveniji) in njene meje, ki segajo do severnega Jadranskega morja. Razteza se na približno 1000 km^2, pri čemer 30 % ozemlja spada pod Italijo, 70 % pa pod Slovenijo. Območje, na katerem poteka študija, se razteza med 13,47 zemljepisne dolžine in 45,55 zemljepisne širine ter 14,05 zemljepisne dolžine in 45,96 zemljepisne širine (EPSG:4326-WGS84). Za območje je značilno tako zgornje sredozemsko podnebje na obali kot bolj celinsko fitoklimatsko območje v notranjosti. Kras/Carso je klasičen primer kraške planote z apnenčasto podlago, ki se od obale hitro dviga do 350 m nadmorske višine, s hribovitimi grebeni, ki segajo od 400 do 700 m nadmorske višine. Vegetacija se spreminja od obalnih zaplat hrasta črnike (*Quercus ilex*), do združb črnega gabra (*Ostry carpinfolioa*), jesena (*Fraxinus ornus*) in puhastega hrasta (*Quercus pubescens*), ki vse bolj prekriva opuščene suhe kraške pašnike in travnike (Oriolo et al., 2021). Pogoste so zaplate tujerodnih gozdov črnega bora (*Pinus nigra*), ki izvirajo iz prizadevanj za pogozdovanje v 19. stoletju.



Slika 1 Preučevano območje – Italija (levo), Slovenija (desno).

3 MATERIALI IN METODE

Za oceno in kartiranje **verjetnosti nevarnosti požarov v naravi** (ang. *wildfire hazard probability*; v nadaljevanju »požarna nevarnost«) smo uporabili modeliranje z MaxEntom, **za ranljivost zaradi požarov** (ang. *wildfire vulnerability*; v nadaljevanju »požarna ranljivost«) pa večkriterijsko analizo odločanja (MCDA) z uporabo analitičnega hierarhičnega procesa (AHP). Pred izvedbo analiz so bile na podlagi razpoložljivih (in primerljivih) čezmejnih podatkov izbrane pojasnjevalne spremenljivke, ki lahko predstavljajo dejavnike, ki prispevajo k nastanku in širjenju požarov v naravi.

3.1 Pojasnjevalne spremenljivke

Na podlagi pregleda literature (Gigović & Sekulović, 2018; Maniatis et al., 2022; Mishra et al., 2023; Nuthammachot & Stratoulias, 2021; Sivrikaya & Küçük, 2022; Trucchia et al., 2022, 2023; Yang et al., 2021) smo kot potencialne dejavnike, ki vplivajo na požarna nevarnost in ranljivost, izbrali **11 pojasnjevalnih spremenljivk** ter jih uporabili za modeliranje in analize. To je zajemalo spremenljivke, ki odražajo različne **antropogene** (oddaljenost od železnic, cest (glavne ceste, gozdne ceste in pohodniške poti) in naselij), **okoljske** (pokrovnost/raba tal), **klimatske** (padavine in temperatura) in **topografske značilnosti** (ekspozicija, nadmorska višina, naklon, topografski pozicijski indeks (ang. *Topographic Position Index*, TPI), indeks topografske vlažnosti (ang. *Topographic Wetness Index*, TWI). Seznam spremenljivk skupaj z njihovim razponom in viri podatkov je v preglednici 1. Za izračun in obdelavo vseh spremenljivk sta bila uporabljena programa ESRI ArcGIS Pro 3.4.0 (ESRI, Redlands, CA, ZDA) in QGIS 3.40.4 (QGIS Development Team, 2025).

Zaradi čezmejne narave študijskega območja je bilo pri zbiranju in standardizaciji vhodnih podatkov nekaj izzivov. Da bi dosegli čim boljšo prostorsko ločljivost podatkov, smo poskušali čim več podatkov pridobiti od državnih ali regionalnih uradnih služb (preglednica 1). Podatke, ki odražajo antropogene značilnosti smo pridobili od Geodetske uprave Republike Slovenije (GURS) in Infrastrukture za okoljske in prostorske podatke (IRDAT) Avtonomne dežele Furlanije-Julijske krajine (RAFVG). Poleg tega je bil ob spoznanju, da ima Openstreetmap (OSM) popolnejši prikaz pohodniških poti tako v Italiji kot v Sloveniji, cestni sloj integriran z elementi, prenesenimi s strežnika OSM. Antropogene sloje, ki so bili za obe strani na voljo v vektorski obliki, smo najprej združili v en sam sloj za vsako spremenljivko posebej in jih nato rasterizirali. Za izdelavo slojev razdalj smo uporabili orodje za izračun evklidske razdalje..

Za izdelavo sloja pokrovnosti/rabe tal so bili uporabljeni nacionalni in regionalni sloji pokrovnosti/rabe tal, ki so imeli bistveno večjo ločljivost kot evropski podatki Corine Land Cover (CLC). Slednji je bil kljub temu uporabljen za izdelavo enotne opredelitve posameznih tipov pokrovnosti/rabe tal za italijanski in slovenski sloj. Tako je bilo ob združitvi obeh slojev mogoče dodeliti ustrezno kategorijo pokrovnosti/rabe tal iz klasifikacije CLC. Poleg tega so bila s poudarkom na spremenljivki gozdni sestoj iz sloja odstranjena območja, ki spadajo v kategorijo gozdnega pokrova, in nadomeščena s satelitsko pridobljenimi podatki Copernicus tip gozda (ang. *Forest Type*) visoke ločljivosti, ki natančno opredeljuje do majhnih zaplat gozda in jih ločuje na listnate ali iglavce.

Zaradi različnih prostorsko-časovnih značilnosti državnih/regionalnih podnebnih podatkov za Italijo in Slovenijo, smo se odločili, da uporabimo podnebne podatke za trenutno (1981–2010) in bližnje prihodnje stanje (2011–2040), ki so na voljo na podatkovnem portalu CHELSA Climate (Brun et al., 2022; Karger et al., 2017). Ker so bili podnebni podatki na voljo v ločljivosti 1 km × 1 km, smo jih pretvorili celično ločljivost 3 m × 3 m. Za izračun topografskih značilnosti smo uporabili digitalni model reliefa (DMR) z ločljivostjo celice 1 m × 1 m, ki smo ga pridobili od Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO) in IRDAT FVG (preglednica 1). Vsi sloji spremenljivke so bili nato prostorsko obrezani na enak obseg preučevanega območja in pretvorjeni na enako ločljivost celic (tj. 3 m × 3 m). Za izvoz rastrskih slojev v MaxEntu berljivo obliko smo pretvorili rastrske sloje iz formata *.geotiff* v format *.ascii*..

Pred modeliranjem in analizo smo z dvema različnima testoma v programu ArcGIS Pro preverili korelacijo med spremenljivkami. Za izdelavo korelacijske matrike je bilo uporabljeno orodje »Band collection statistics«, za pridobitev informacij o faktorju inflacije variance (ang. *variance inflation factor*, VIF) pa orodje »Ordinary Least Squares (OLS)«. Ker sta oba testa kolinearnosti pokazala, da sta dve spremenljivki korelirani (nadmorska višina in temperatura, preglednici 2 in 3), smo se odločili, da iz analiz izločimo spremenljivko nadmorska višina in ohranimo spremenljivko temperatura.

Preglednica 1: Seznam pojasnjevalnih spremenljivk z virom podatkov.

	Spremenljivka	Vir podatkov SLO	Vir podatkov ITA
Antropogene	Oddaljenost od glavnih cest, gozdne cest in pohodniških poti	Podatki Geodetske uprave Republike Slovenije (GURS), Openstreetmap	RAFVG, ISPRA, Insiel S.p.a., Openstreetmap
	Oddaljenost od železnic		
	Oddaljenost od naselij		
Okoljske	Pokrovnost/raba tal	Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano (MKGP), Corine Land Cover (CLC)	RAFVG, Corine Land Cover (CLC)
Klimatske	Letna količina padavin (1981–2010)	CHELSA Climate (Brun et al., 2022; Karger et al., 2017)	
	Povprečna letna temperatura zraka (1981–2010)		
	Letna količina padavin (2011–2040)		
	Povprečna letna temperatura zraka (2011–2040)		
Topografske	Ekspozicija	Podatki LiDAR (ločljivost celice 1 m × 1 m), Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO)	Podatki LiDAR (ločljivost celice 1 m × 1 m), RAFVG
	Naklon		
	Topografski pozicijski indeks (TPI)		
	Indeks topografske vlažnosti (TW)		

Preglednica 2: Korelacijska matrika za pojasnjevalne spremenljivke. 1 – Ekspozicija, 2 – Nadmorska višina, 3 – Raba tal, 4 – Padavine, 5 – Oddaljenost od železnic, 6 – Oddaljenost od cest, 7 – Naklon, 8 – Oddaljenost od naselij, 9 – Temperatura, 10 – TPI, 11 – TWI

Spremenljivka	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	-0,02	-0,05	-0,06	-0,01	-0,02	-0,01	-0,05	0,03	0,01	-0,00
2	-0,02	1	0,31	0,25	0,32	0,09	0,11	0,44	**-0,94**	0,10	-0,03
3	-0,05	0,31	1	0,19	0,17	0,09	0,25	0,39	-0,29	0,02	-0,08
4	-0,06	0,25	0,19	1	0,07	0,15	0,06	0,16	-0,41	0,01	-0,05
5	-0,01	0,32	0,17	0,07	1	0,12	0,10	0,22	-0,40	0,02	-0,01
6	-0,02	0,09	0,09	0,15	0,12	1	-0,02	0,18	-0,15	0,02	0,01
7	-0,01	0,11	0,25	0,06	0,10	-0,02	1	0,06	-0,14	-0,12	-0,37
8	-0,05	0,44	0,39	0,16	0,21	0,18	0,06	1	-0,41	0,04	-0,00
9	0,03	**-0,94**	-0,29	-0,41	-0,40	-0,15	-0,14	-0,41	1	-0,04	0,02
10	0,01	0,10	0,02	0,01	0,02	0,02	-0,12	0,04	-0,04	1	-0,27
11	-0,00	-0,03	-0,08	-0,05	-0,01	0,01	-0,37	-0,00	0,02	-0,27	1

Preglednica 3: VIF vrednosti za pojasnjevalne spremenljivke.

Spremenljivka	VIF vrednost
Ekspozicija	1,02
Nadmorska višina	**18,43**
Raba tal	1,07
Padavine	2,36
Oddaljenost od železnic	1,15
Oddaljenost od cest	1,10
Naklon	1,22
Oddaljenost od naselij	1,24
Temperatura	**22,87**
TPI	1,25
TWI	1,26

3.2 Točke vžiga požarov v naravi

Za modeliranje požarne nevarnosti in validacijo požarne ranljivosti smo uporabili točke vžiga požarov v naravi (v nadaljevanju »požari«), ki smo jih pridobili od Zavoda za gozdove Slovenije in IRDAT FVG. Nabor podatkov je skupaj vseboval 2367 točk, od katerih je bilo 724 točk zbranih v obdobju 1994–2024 za slovenski del in 1643 točk v obdobju 1990–2024 za italijanski del preučevanega območja.

Ker se požari na določenih območjih pojavljajo pogosteje (v gručah), smo nabor podatkov prostorsko filtrirali, da bi se izognili pristranskosti modela na določenih lokacijah zaradi prostorske avtokorelacije. Nabor podatkov smo filtrirali na podlagi orodja »Spatially rarefy occurrence data tool« iz zbirke orodij »SDM« za ArcGIS Pro (Brown, 2014), ki omogoča, da se lokacije prisotnosti zmanjšajo na eno točko v okviru določene evklidske razdalje (Brown, 2014). Uporabili smo tri različne pragove razdalj (100, 250 in 500 m) in ocenili prag 250 m kot najprimernejši. Na razdalji 100 m so bile gruče še vedno prisotne, na razdalji 500 m pa so bili podatki preveč redki (preglednica 4). Za modeliranje požarne nevarnosti v programu MaxEnt so bile filtrirane točke požarov (prag 250 m) izvožene kot datoteka *.csv* s tremi zahtevanimi stolpci: vrsta (v našem primeru »požar«), zemljepisna dolžina in zemljepisna širina. Za validacijo rezultatov požarne ranljivosti (MCDA/AHP) in vizualni pregled požarne nevarnosti (Maxent) smo izvedli prostorsko povezavo med vsemi požari in zemljevidi ranljivosti/nevarnosti. Vsak razred ranljivosti/nevarnosti smo primerjali s številom požarov.

Preglednica 4: Število odstranjenih podvojitev, prostorsko avtokoreliranih odstranjenih točk in točk v končnem naboru podatkov za tri različne pragove razdalje (100, 250 in 500 m) z orodjem »Spatially rarefy occurrence data tool«.

	Št. odstranjenih podvojitev	Št. prostorsko avtokoreliranih odstranjenih točk	Št. točk v končnem naboru podatkov
100 m prag	9	583	1775
250 m prag	9	1152	1206
500 m prag	9	1614	744

3.3 Analiza verjetnosti požarne nevarnosti z MaxEnt modeliranjem

MaxEnt je široko namensko programsko orodje za strojno učenje, ki je bilo razvito predvsem za modeliranje porazdelitve vrst. Na splošno MaxEnt ocenjuje verjetnost prisotnosti pojava (npr. ciljne vrste) na podlagi znanih lokacij prisotnosti in pojasnjevalnih spremenljivk z uporabo pristopa največje entropije (Phillips, 2017; Phillips et al., 2006; Phillips & Dudík, 2008). Modeliranje MaxEnt ima številne prednosti: programska oprema omogoča enostavno uporabo, dopušča uporabo podatkov samo o prisotnosti (ne pa tudi odsotnosti) in omogoča delo z majhnimi vzorci podatkov, podpira uporabo zveznih in kategoričnih spremenljivk, neposredno izdela prostorsko eksplicitno karto primernosti, pomembnost posameznih spremenljivk za model pa je mogoče enostavno oceniti z vgrajenim testom "Jackknife" (Phillips, 2017; Phillips et al., 2006; Phillips & Dudík, 2008). Poleg številnih prednosti so bile pri modeliranju z MaxEntom ugotovljene tudi nekatere pomanjkljivosti, vključno s pretiranim prilagajanjem, pristranskimi podatki o prisotnosti, nekoliko vprašljive pa so tudi metode za ocenjevanje uspešnosti modela (Phillips et al., 2009; Phillips & Dudík, 2008).

Za modeliranje napovedi sta potrebni dve vrsti podatkov. Prva je znana prisotnost/razširjenost pojava, ki ga je treba napovedati (v našem primeru vzorčne točke vžiga požarov v naravi na preučevanem območju, vsaka opredeljena z zemljepisno širino in dolžino), druga pa so podatki o spremenljivkah, ki opisujejo značilnosti preučevanega območja (npr. okoljske, topografske, antropogene) znotraj območja razširjenosti preučevanega pojava (Merow et al., 2013; Phillips et al., 2006). Pri modeliranju obseg rastrskih celic določa območje, na katerem bo Maxent določil verjetnost prisotnosti oz. porazdelitve. Točke prisotnosti so pripisane rastrskim celicam, ki predstavljajo vzorčne točke. Na podlagi obsega preučevanega območja orodje ustvari točke ozadja, ki predstavljajo lokacije, razporejene po preučevanem območju, kjer je prisotnost možna, vendar neznana. Točke ozadja se uporabljajo za modeliranje značilnosti območja na neznanih lokacijah in njihovo primerjavo z značilnostmi območja na znanih lokacijah prisotnosti (Merow et al., 2013; Phillips et al., 2006). Model zahteva, da so podatki o spremenljivkah v enakem obsegu in ločljivosti za vsako celico (Phillips, 2017).

Za modeliranje z Maxentom je bilo uporabljeno samostojno odprtokodno orodje Java Maxent (ver. 3.4.4) (Phillips et al., 2017). V orodju smo izbrali ustvarjanje odzivnih krivulj (ang. *Response curves*), test »Jackknife« in slike napovedi. Kot format izhodnih podatkov smo izbrali privzeti cloglog, ki daje oceno verjetnosti prisotnosti med 0 in 1 in je najlažji za razlago (Phillips, 2017). V osnovnih nastavitvah smo koeficientu regularizacije (ang. *regulariaztion multiplier*) nastavili vrednost 1,5, da bi se izognili pretiranemu prilagajanju in dobili bolj razpršene, manj lokalizirane napovedi. Za oceno uspešnosti modela smo uporabili metodo *k*-kratnega navzkrižnega preverjanja (ang. *k-fold cross-validation*), pri kateri se podatki o prisotnosti naključno razdelijo v več enako velikih skupin (tj. podvzorcev) za učenje in testiranje. Model nato izmenično izloča posamezen vzorec iz kreiranja modela in ga v nadaljevanju uporabi za validacijo rezultatov (Phillips, 2017). Izbrali smo pet ponovitev ($k = 5$) navzkrižnega preverjanja. Druge nastavitve so bile privzete.

Za oceno prihodnje požarne nevarnosti v spreminjajočih se podnebnih razmerah smo za poenostavljeno napoved podnebnih sprememb uporabili nastavitev »Projection«. Nastavitev »Projection layers directory« smo nastavili na mapo, ki vsebuje enake pojasnjevalne spremenljivke kot za splošno Maxent modeliranje (mapa »Layers«), vendar sta spremenljivki padavin in temperature vsebovali vrednosti za prihodnje podnebne scenarije (2011–2040).

3.4 MCDA/AHP pristop za analizo požarne ranljivosti

Za oceno ranljivosti na podlagi MCDA so bile v prvem koraku izbrane spremenljivke razvrščene v pet razredov (glede na razpone vrednosti ali kategorije), katerim so bili dodeljeni ustrezni razredi ranljivosti s povezanimi ocenami (preglednica 5). Ta postopek je temeljil na pregledu obstoječe literature s podobnimi razvrstitvami spremenljivk v razrede ranljivosti požarov v naravi (npr. Djabri et al., 2024; Gigović et al., 2018; Maniatis et al., 2022; Sivrikaya & Küçük, 2022), vendar je bila naša razvrstitev prilagojena značilnostim preučevanega območja (preglednica 6).

Preglednica 5: Stopnje ranljivosti.

1	Nizka ranljivost

2	Zmerna ranljivost
3	Visoka ranljivost
4	Znatno visoka ranljivost
5	Izjemno visoka ranljivost

V drugem koraku je bila za študijsko območje izdelana georeferencirana rastrska mreža z ločljivostjo 3 m × 3 m. Da bi lahko primerjali različna merila, je bila za vsako določeno spremenljivko vsakemu pikslu rastra dodeljena vrednost od 1 do 5, ki ustreza relativni stopnji požarne ranljivosti, kot je prikazano v preglednici 5. Za pridobitev končnega zemljevida ranljivosti je bilo 10 rastrskih slojev posameznih spremenljivk, razvrščenih po ocenah ranljivosti, prostorsko združenih z metodo tehtanega seštevka v skladu z naslednjo enačbo, kjer so m, n, p in q uteženi koeficienti, ki so dodeljeni glede na relativno pomembnost po metodi AHP:

požarna ranljivost = m × antropogeni faktorji + n × klimatski faktorji + p × topografski faktorji + q × okoljski faktorji

Preglednica 6: Seznam spremenljivk, razvrščenih po razredih, z razponom in razredi ranljivosti.

	Spremenljivka	Razpon (min–max)	Razredi*	Stopnje ranljivost (1, nizka - 5, visoka)*
Antropogene	Oddaljenost od glavnih cest, gozdne cest in pohodniških poti	0–1266,43 m	0–200 m	5
			400–600 m	4
			600–800 m	3
			800–1000 m	2
			> 1000 m	1
	Oddaljenost od železnic	0–11.389,14 m	0–100 m	5

			100–200 m	4
			200–500 m	3
			500–1000 m	2
			> 1000 m	1
	Oddaljenost od naselij	0–2509,65 m	0–500 m	5
			500–1000 m	4
			1000–1500 m	3
			1500–2000 m	2
			> 2000 m	1
Okoljske	Pokrovnost/raba tal	/	1: umetne površine	1
			2: kmetijske površine	2
			2: polnaravne površine, kmetijsko zemljišče v zaraščanju, prehodno grmičevje	3
			3: listnati gozd	4
			4: iglasti gozd	5
			5: druge naravne površine (skalovje, močvirje, ...)	2
			6: voda	0/N/A
	Letna količina padavin (1981–2010)	1344,8 - 2365,83 mm	0–1500 mm	5
			1500–1700 mm	4
			1700–1900 mm	3
			1900–2100 mm	2
			> 2100 mm	1
	Povprečna letna temperatura zraka (1981–2010)	9.5–14,6 °C	9.5–10.5 °C	1
			10.5–11.5 °C	2
			11.5–12.5 °C	3
			12.5–13.5 °C	4
			> 13.5 °C	5
	Letna količina padavin (2011–2040)	1423,8–2520,3 mm	0–1500 mm	5
			1500–1700 mm	4
			1700–1900 mm	3
			1900–2100 mm	2

Topografske			> 2100 mm	1
	Povprečna letna temperatura zraka (2011–2040)	11,1–16,2°C	9.5–10.5 °C	1
			10.5–11.5 °C	2
			11.5–12.5 °C	3
			12.5–13.5 °C	4
			> 13.5 °C	5
	Ekspozicija	0–360°	337.5 – 67.5°	1
			67.5 – 112.5°, 292.5 – 337.5°	2
			112.5 – 157.5°	3
			247.5 – 292.5°	4
			157.5 – 247.5°	5
	Nadmorska višina	0–740,30 m	0–150 m	5
			150–300 m	4
			300–450 m	3
			450–600 m	2
			> 600 m	1
	Naklon	0–83,17°	<5%	1
			5 - 15%	2
			15 - 25%	3
			25 – 35%	4
			>35%	5
	Topografski pozicijski indeks (TPI)	-339,54–48,54	1: < -1 = dolina/depresija	1
			2: -1– -0.5 = ravnina/spodnje pobočje	2
			3: -0.5–0.5 = srednje pobočje	3
			4: 0.5–1 = zgornje pobočje	4
			5: > 1 = greben	5
	Indeks topografske vlažnosti (TWI)	-2,39–25,48	< 5	5
			5–6.5	4
			6.5–8.5	3
			8.5–12	2
			> 12	1

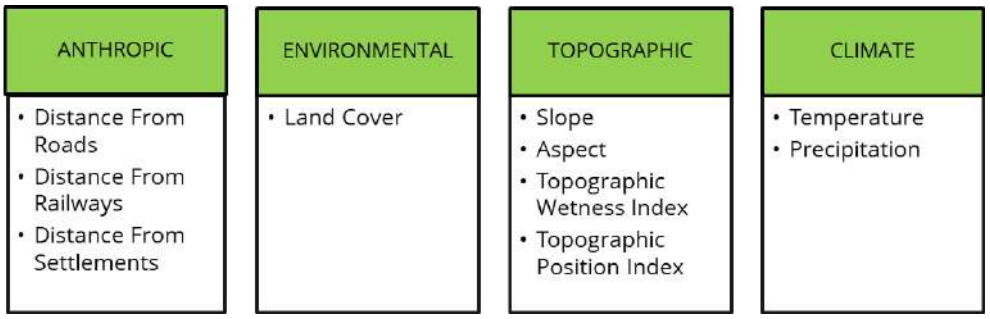
	Točke vžiga gozdnih požarov	/	/	/

V AHP se utež vsakega merila izračuna na podlagi parne primerjalne matrike, kjer se vsako merilo primerja med seboj z dodelitvijo relativne vrednosti pomembnosti od 1 (enako pomembno) do 9 (veliko pomembnejše), kot je prikazano v preglednici 7. Vmesne vrednosti 2, 4, 6 in 8 se uporabljajo za označevanje vmesnih situacij. Nasprotno se za opis relativno nižjega pomembnostnega gradienta uporablja ista lestvica z obratnimi vrednostmi (od 1 do 1/9).

Preglednica 7: Vrednosti relativne pomembnosti za parno primerjavo spremenljivk v AHP.

Pomembnost	**Definicija**
1	*Enak pomen*
3	*Zmeren pomen*
5	*Velik pomen*
7	*Zelo velik pomen*
9	*Absolutna pomembnost*

Parna primerjava za AHP je bila izvedena v dveh korakih, najprej je bila izvedena primerjava



spremenljivk znotraj vsake kategorije posebej, nato pa še skupna parna primerjava med štirimi kategorijami (slika 2).

Slika 2 Skupine značilnosti (antropogene, okoljske/klimatske, topografske) za MCDA/AHP.

Kot rezultat so bile izdelane štiri matrike za parno primerjavo:
- Parna primerjava antropogenih spremenljivk
- Parna primerjava topografskih spremenljivk
- Parna primerjava podnebnih spremenljivk
- Parna primerjava makrodejavnikov.

Teža vsake posamezne spremenljivke v končni enačbi je zmnožek uteži, dobljene v njeni podmatrici, in uteži njene kategorije. Edina izjema je bila spremenljivka pokrovnost/raba tal, ki je samostojna v kategoriji okoljskih spremenljivk. Določitev vrednosti relativne pomembnosti v matrikah parnih primerjav je temeljila na pregledu literature in/ali dogovoru med raziskovalci, ki so sodelovali v tej analizi. Skladnost med vsemi ocenami je bila merjena tudi z indeksom skladnosti, ki se šteje za sprejemljivega, če je manjši od 0,01 (Saaty, 2002), da se oceni, ali so dodeljene vrednosti skladne.

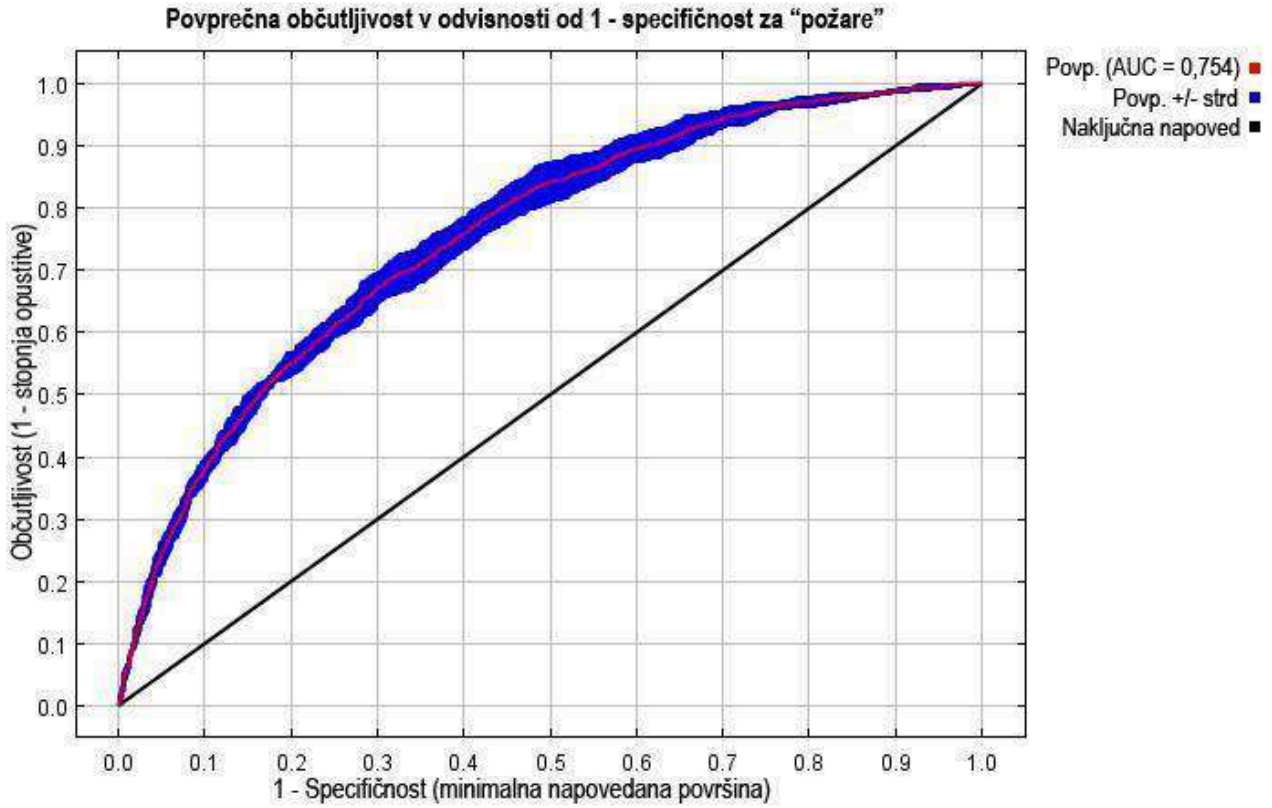
Po izračunu uteži in preverjanju skladnosti, so bile z uporabo GIS orodij vse spremenljivke prostorsko združene z zgoraj navedeno enačbo, s čimer je bil ustvarjen rastrski zemljevid ranljivosti z razponom vrednostmi med 0 in 5. Raster je bil nato razvrščen v 5 končnih razredov ranljivosti:

- 0-1 = nizka ranljivost
- 1-2 = zmerna ranljivost
- 2-3 = visoka ranljivost
- 3-4 = znatno visoka ranljivost
- 4-5 = izjemno visoka ranljivost

4 REZULTATI IN DISKUSIJA

4.1 Analiza verjetnosti požarne nevarnosti

Uspešnost celotnega modela smo vrednotili na podlagi vrednosti AUC (območje pod krivuljo ROC, ang. *area under the receiver operating characteristic curve - ROC curve*). Povprečna vrednost AUC petih iteracij modela je bila 0,754 s standardnim odklonom ± 0,014 (slika 3). Glede na to, da je vrednost AUC presegla 0,75, lahko rezultate modeliranja napovedi požarov štejemo za statistično uspešne (Phillips & Dudík, 2008). Vrednosti AUC petih iteracij modela so predstavljene v preglednici 8.



Slika 3 Krivulja ROC s povprečno vrednostjo AUC petih modelov. Rdeča črta prikazuje povprečno vrednost AUC petih iteracij modela za učne podatke, modra črta pa povprečne vrednosti ± standardni odklon testnih podatkov. Črna črta predstavlja uspešnost naključne napovedi.

Preglednica 8: Vrednosti AUC za učne in testne podatke za pet iteracij modela.

Model	1	2	3	4	5
Učni podatki	0,762	0,768	0,764	0,761	0,766
Testni podatki	0,766	0,735	0,760	0,768	0,740

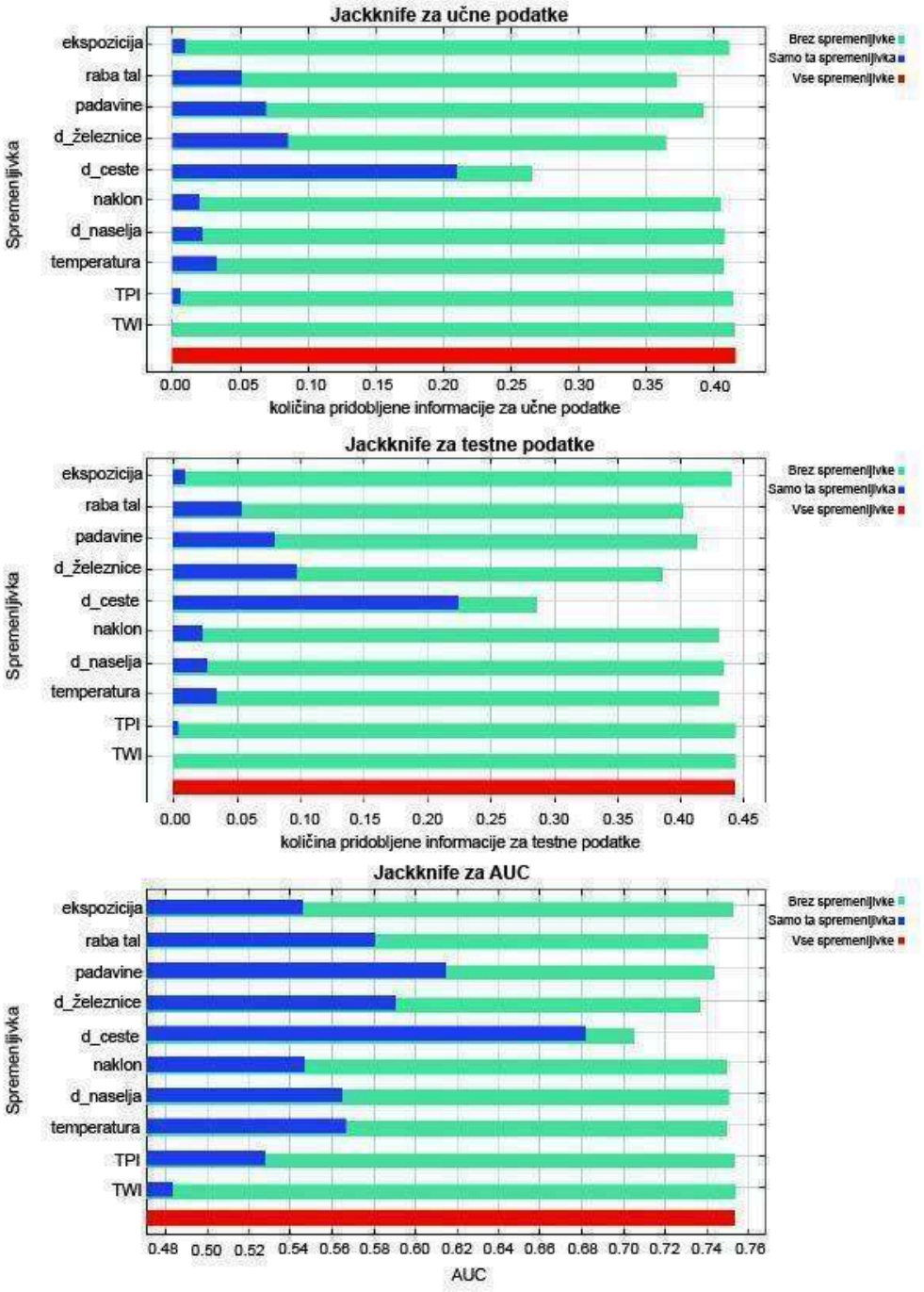
Za oceno vpliva vsake spremenljivke na model so bili upoštevani naslednji kazalniki: prispevek vsake spremenljivke (%) h končni napovedi modela, pomembnost spremenljivk glede na test »Jackknife« in možnost izdelave odzivnih krivulj. Največji prispevek je bil pripisan spremenljivkam iz skupine antropogenih in okoljskih spremenljivk, tj. oddaljenosti od cest (50,6 %), rabi tal (16,3 %) in oddaljenosti od železnic (16,1 %) (preglednica 8). Topografske značilnosti (ekspozicija, TPI in TWI) so imele najmanjši prispevek k modelu (preglednica 9).

Preglednica 9: Prispevek in pomembnost spremenljivk k požarni nevarnosti pri Maxent modeliranju.

Spremenljivka	Prispevek (%)	Pomembnost permutacije (%)
Oddaljenost od cest	**50,6**	**44,9**
Raba tal	**16,3**	**16,2**
Oddaljenost od železnic	**16,1**	**12,7**
Padavine	7,0	11,6
Temperatura	2,8	4,5
Naklon	2,8	3,5
Oddaljenosti od naselij	2,7	4,0
Ekspozicija	0,9	1,8
TPI	0,7	0,6
TWI	0,1	0,2

Rezultati testa Jackknife prikazujejo pomembnost spremenljivk za model (slika 4). Pri testu »Jackknife« za učenje, testiranje in AUC je spremenljivka z največjo vrednostjo informacijskega prispevka (ang. *gain*), če se uporablja samostojno, razdalja do cest. Torej se kaže, da ima ta spremenljivka sama po sebi najbolj uporabne informacije. Podobno je bilo napovedovanje modela najmanj uspešno ob odsotnosti iste spremenljivke, kar pomeni, da ta spremenljivka vsebuje informacije, ki jih druge nimajo. Rdeča črta označuje uspešnost modela ob upoštevanju vseh spremenljivk. Če primerjamo grafa za učne in testne podatke,

vidimo, da je splošna uspešnost testnih podatkov nekoliko višja. Pomembnost posameznih spremenljivk v obeh grafih je zelo podobna (slika 4).



Slika 4 Rezultati testa »Jackknife« za spremenljivke pri učenju, testiranju in AUC.

MaxEnt za vsako spremenljivko, uporabljeno pri modeliranju, izdela odzivne krivulje v obliki grafa. Na krivuljah prikaže kako se napovedana verjetnost prisotnosti spreminja s spreminjanjem vsake spremenljivke, pri čemer vse druge spremenljivke ostanejo na povprečni vrednosti vzorca. (Phillips, 2017). Na podlagi odzivnih krivulj, predstavljenih na sliki 5, lahko vidimo, da je predvidena verjetnost požarne nevarnosti največja na ekspozicijah z vrednostmi 150–250^0. To pomeni, da je največja verjetnost požarne nevarnosti na območjih usmerjenih proti jugu in jugozahodu, medtem ko je verjetnost požarne nevarnosti najmanjša na območjih usmerjenih proti severu (okoli 0 oziroma 360^0).

Požarna nevarnost je največja (> 60 %) v kategorijah rabe tal 3, 5 in 6, ki predstavljajo polnaravna in zaraščena območja, iglaste gozdove in druga naravna območja. Požarna nevarnost je po drugi strani najmanjša (< 30 %) v kategoriji rabe tal 1 (umetne površine).

Odzivna krivulja kaže, da je verjetnost požarne nevarnosti največja pri nizkih količinah padavin, z naraščanjem padavin se zmanjšuje, nato pa se ponovno poveča pri zelo visokih količinah padavin (2200 mm). Zadnje povečanje je lahko posledica topografskih vplivov na pojavljanje požarne nevarnosti (npr. veliko število požarov v preteklosti na višjih legah, ki prejmejo več padavin).

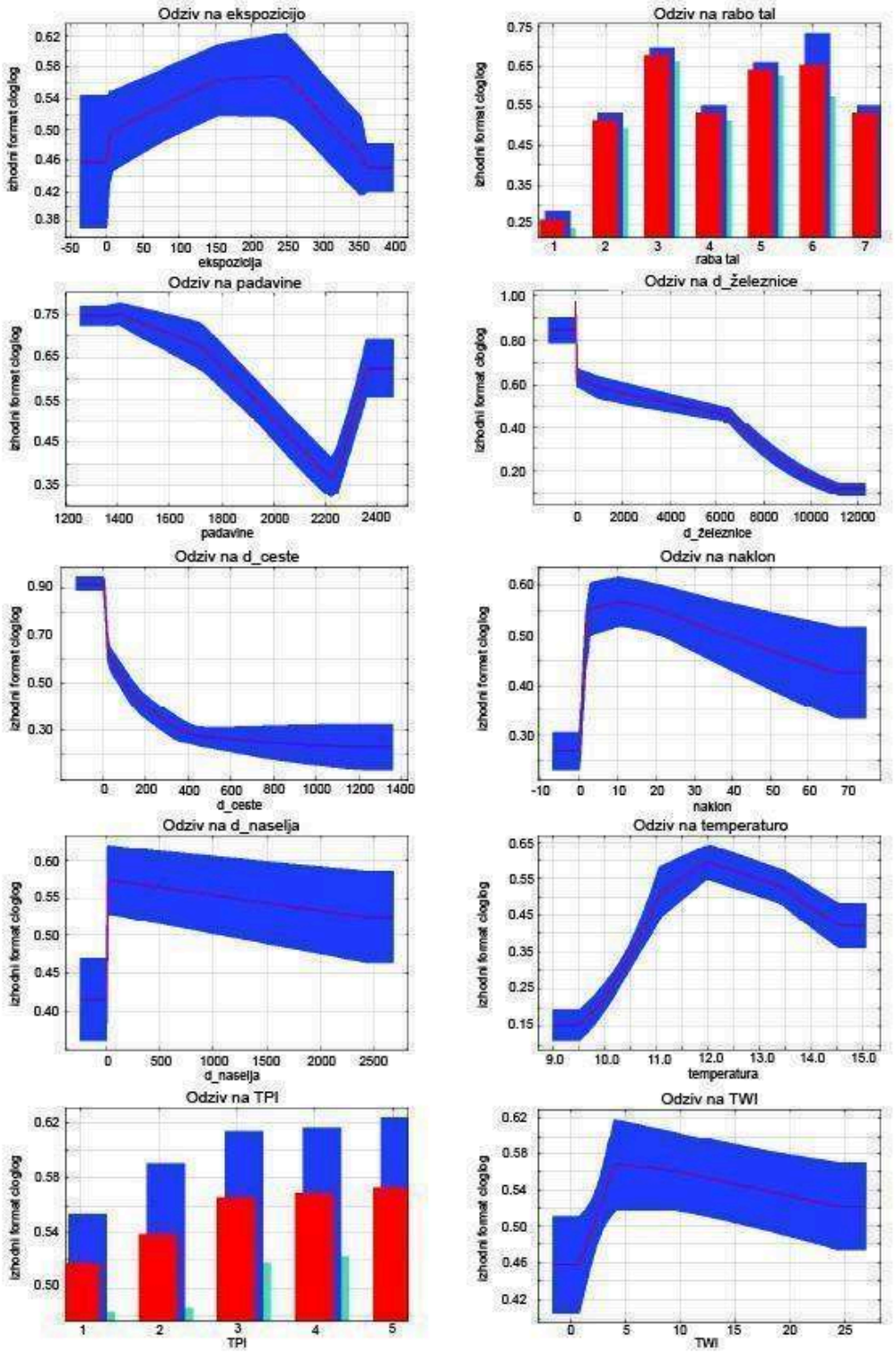
MaxEnt kaže na močno negativno korelacijo med oddaljenostjo od železnic in cest ter verjetnostjo požarne nevarnosti, kar pomeni, da bližina prometne infrastrukture močno vpliva na požarno nevarnost. Podobno se napovedana verjetnost zmanjšuje z oddaljenostjo od naselij.

Krivulja odziva kaže, da je verjetnost požarne nevarnosti najmanjša na ravnem terenu, hitro narašča na blagih pobočjih (0–10°), nato pa se postopoma zmanjšuje na strmejših pobočjih. To kaže, da je požarna nevarnost bolj verjetna na območjih z zmernimi nakloni.

Verjetnost požarne nevarnosti narašča s temperaturo, najvišjo vrednost doseže pri 11,5–12 °C, nato pa se pri višjih temperaturah postopoma zmanjšuje. Zmerne temperature so torej najbolj ugodne za nastanek požara. To je morda zaradi optimalnih pogojev pri katerih prihaja do izsuševanja vegetacije, medtem ko so nižje in višje temperature zaradi zadrževanja oz. pomanjkanja vlage morda manj ugodne za nastanek požara.

Odzivna krivulja za TWI je podobna krivulji za temperature in kaže, da se verjetnost požarne nevarnosti poveča pri zmerni vlažnosti, doseže vrh pri vmesnih vrednostih in nato upade, ko se vlažnost še poveča. Ta vzorec verjetno odraža ravnovesje med razpoložljivostjo goriva in vlage: na zmerno vlažnih območjih je lahko več vegetacije, kar zagotavlja dovolj goriva za požare, medtem ko na zelo suhih območjih primanjkuje biomase, na zelo mokrih območjih pa se zadržuje preveč vlage, da bi se požar lahko širil.

Verjetnost požarne nevarnosti se povečuje z višjimi vrednostmi TPI, kar pomeni, da je večja verjetnost nastanka požara na dvignjenem terenu, kot so grebeni in zgornja pobočja. Ta vzorec je verjetno posledica večje izpostavljenosti vetru, boljše drenaže, ki zmanjšuje zadrževanje vlage, in večjega sončnega sevanja, ki ustvarja bolj suhe razmere, medtem ko nižje vrednosti TPI (ravna/nižja pobočja in doline/depresije) zadržujejo več vlage, zato so manj dovzetne za požare.

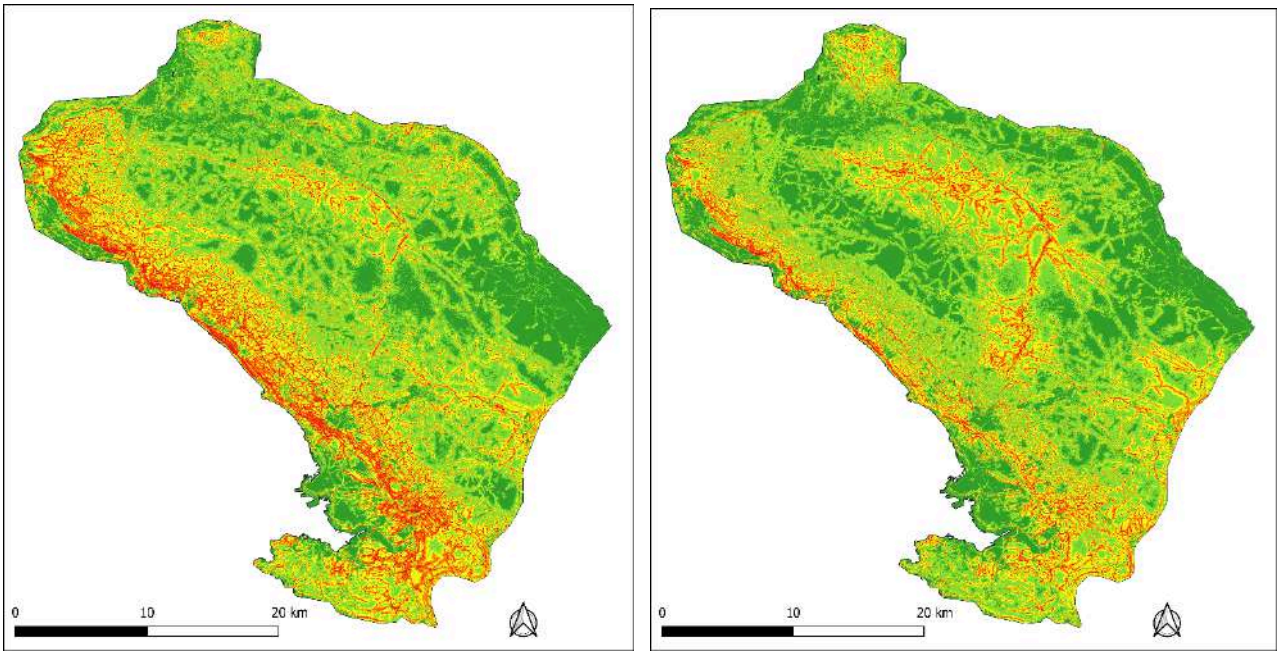


Slika 5 Odzivne krivulje, ki prikazujejo, kako posamezna spremenljivka vpliva na napoved Maxenta. Krivulje prikazujejo povprečni odziv petih ponovljenih modelov (rdeča barva) in ± standardni odklon (modra barva; dva odtenka za kategorične spremenljivke).

Končni sloji trenutne in prihodnje požarne nevarnosti so bili klasificirani v pet stopenj požarne ogroženosti (tj. nizka, zmerna, visoka, znatno visoka in izjemno visoka) na podlagi opredeljenega intervala z velikostjo intervala 0,20 (slika 6). Pet razredov z različnimi stopnjami klasificirane požarne nevarnosti je obsegalo 22,71 %, 38,20 %, 23,00 %, 10,30 % in 5,78 % preučevanega območja (preglednica 10). Največji delež preučevanega območja pokrivajo območja, ki so razvrščena kot območja z zmerno požarno nevarnostjo, in sicer 38,20 % celotnega območja. Sledila so jim območja z visoko (23,00 %) in nizko (22,71 %) požarno ogroženostjo. Območja z znatno visoko in izjemno visoko požarno nevarnostjo so obsegala 10,30 % oz. 5,78 % (preglednica 10). Očitno je, da območja, ki so uvrščena med območja z znatno visoko in izjemno visoko požarno nevarnostjo, predstavljajo razmeroma majhen delež (16,08 %) preučevanega območja.

V scenariju prihodnje požarne nevarnosti je pet stopenj predstavljalo 26,83 %, 40,16 %, 21,25 %, 8,24 % in 3,51 % preučevanega območja (preglednica 10). Podobno kot pri trenutni požarni nevarnosti je največji delež preučevanega območja ostal v kategoriji zmerne požarne nevarnosti, ki je zajemala 40,16 % celotnega območja. Površina kategorije nizka požarna nevarnost se je povečala za 4,12 % na 26,83 %, medtem ko se je kategorija visoka požarna nevarnost nekoliko zmanjšala (na 21,25 %). Delež površin, ki so razvrščene v kategorijo znatno visoke in izjemno visoke požarne nevarnosti, se je zmanjšal za 2,06 % in 2,27 % na 8,24 % oziroma 3,51 % (preglednica 10). To kaže na premik k nižji požarni nevarnosti v prihodnosti, pri čemer bo manj površin z znatno visoko ali izjemno visoko požarno nevarnostjo.

Pri pregledu vzorcev prostorske porazdelitve je razvidna precejšnja geografska raznolikost požarne nevarnosti na preučevanem območju. Območja z visoko, znatno visoko in izjemno visoko požarno nevarnostjo so večinoma razporejena ob obali in okoli večjih naselij, kjer je gostota cest in železnic največja. Projekcije kažejo, da se bo požarna nevarnost na obalnih območjih zmanjšala, medtem ko se bo na v notranjosti skladno s prihodnjimi podnebnimi scenariji povečala (slika 6).



Slika 6 Trenutna (levo) in prihodnja (desno) požarna nevarnost na podlagi MaxEnta.

Preglednica 10: Površina (km^2) in delež (%) razredov požarne nevarnosti za trenutno in prihodnjo požarno nevarnost ter razlika na podlagi modeliranja z MaxEntom.

	Trenutna požarna ogroženost		Prihodnja požarna ogroženost		Razlika	
	Površina	Delež	Površina	Delež	Površina	Delež
Nizka	228,36	22,71	269,78	26,83	41,42	4,12
Zmerna	384,10	38,20	403,83	40,16	19,73	1,96
Visoka	231,28	23,00	213,67	21,25	-17,61	-1,75
Znatno visoka	103,60	10,30	82,88	8,24	-20,72	-2,06
Izjemno visoka	58,12	5,78	35,30	3,51	22,82	-2,27
Skupaj	1005,46	100	1005,46	100	/	/

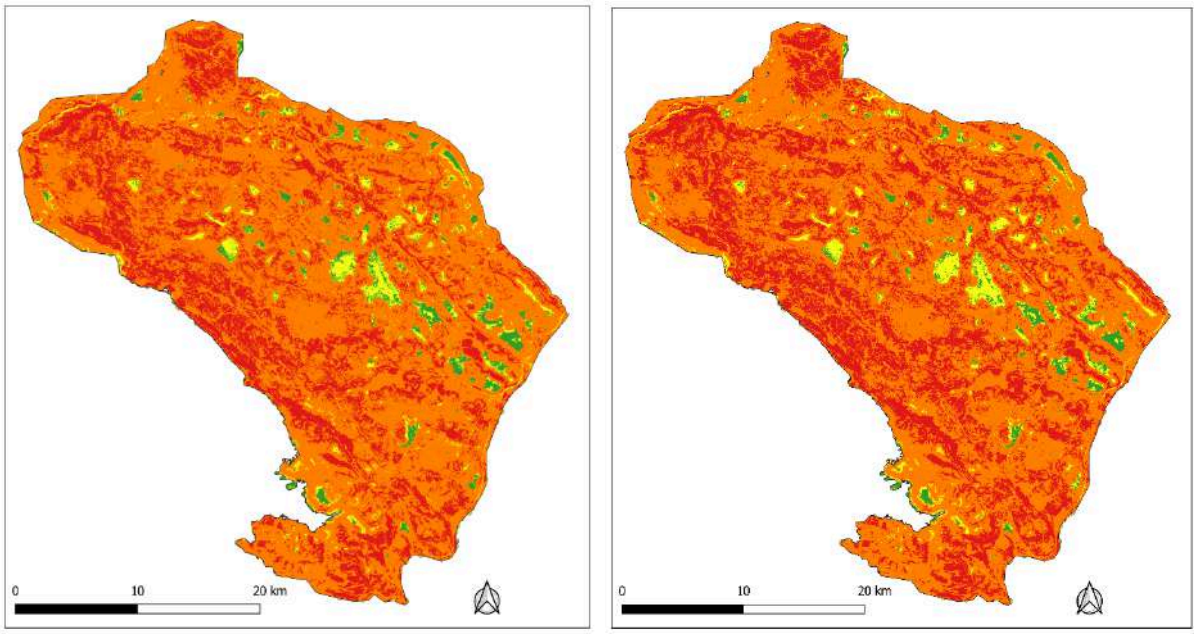
4.2 Analiza požarne ranljivosti

Postopek parne primerjave AHP je bil uspešno izveden, pri čemer so bili indeksi skladnosti precej pod pragom 0,01. Uteži vsake spremenljivke in njihovih kategorij, ki izhajajo iz AHP, so prikazane v preglednici 11. Najpomembnejša skupina makrodejavnikov so antropogeni dejavniki, kar na splošno dokazuje tudi literatura (Djabri et al., 2024; Gigović in Jakovljević, 2018; Sivrikaya in Küçük, 2022), s skupno utežjo 51 %. Med antropogenimi spremenljivkami je najpomembnejša spremenljivka oddaljenost od cest (37 %), sledita ji oddaljenost od naselij (9 %) in železnice (5 %). Na drugem mestu je okoljska spremenljivka, ki jo predstavlja pokrovnost tal z utežjo 31,5 %. Sledijo topografske spremenljivke z 11,6 % in podnebne spremenljivke s 5,8 %.

Preglednica 11: Rezultati primerjave po parih za spremenljivke in njihove kategorije. V zadnjem stolpcu je prikazana končna utež, ki obsega oba koraka hierarhičnega procesa.

	podutež	makroutež	končna utež
Oddaljenost od cest	0,72	0,511	0,3679
Oddaljenost od železnic	0,1		0,0511
Oddaljenost od naselij	0,18		0,092
Naklon	0,42	0,116	0,0486
Ekspozicija	0,42		0,0493
TWI	0,09		0,0101
TPI	0,07		0,0084
Temperatura	0,75	0,058	0,0432
Padavine	0,25		0,0144
Raba tal	-	0,315	0,31

Končne karte ranljivosti (slika 7) kažejo, da v sedanjih podnebnih razmerah pade večina preučevanega območja v razred zelo velike ranljivosti (67 %), sledijo pa mu območja izjemne ranljivosti (25 %; preglednica 12). S prihodnjimi napovedmi se bodo območja izjemne ranljivosti povečala do 30 % na račun območij zelo visoke ranljivosti (62 %; preglednica 12).



Slika 7 Zemljevid ranljivosti s sedanjimi podnebnimi razmerami (levo) in prihodnjimi napovedmi (desno).

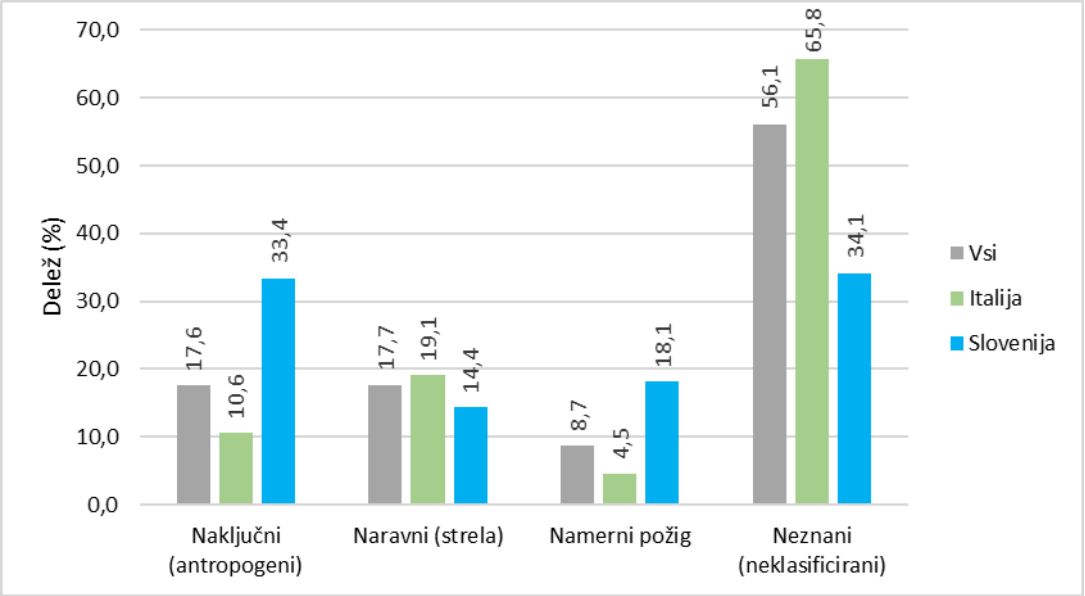
Preglednica 12: Površina (km^2) in delež (%) razredov požarne ranljivosti za trenutno in prihodnjo požarno ranljivost ter razlika.

	Trenutna ranljivost		Prihodnja ranljivost		Razlika	
	Površina	Delež	Površina	Delež	Površina	Delež
Nizka	0,04	0,004	0,02	0,002	-0,02	-0,001
Zmerna	25,1	2,49	21,2	2,11	-3,86	-0,38
Visoka	44,8	4,46	43,3	4,31	-1,52	-0,15
Znatno visoka	679,4	67,58	630,4	62,70	-49,04	-4,87
Izjemno visoka	256,1	25,47	310,4	30,87	54,32	5,40
Skupaj	1005,5	100	1005,5	100	-	-

Kot je razvidno iz analize AHP, so se podnebne spremenljivke v našem scenariju izkazale za najmanj vplivne na ranljivost zaradi gozdnih požarov. Morda zato, ker je ta spremenljivka precej homogena na celotnem preučevanem območju, za katerega so značilne pomembne letne padavine (od 1300 do 2400 mm/leto, preglednica 1). Pomanjkanje podatkov o porazdelitvi padavin med letom in nizka ločljivost podatkov (1 km × 1 km) ne omogočata razlikovanja lokalnih vremenskih vzorcev, ki bi lahko poudarili prisotnost trajnih suhih vremenskih razmer. Poleg tega je zaradi velikega števila spremenljivk težje napovedati količino in porazdelitev padavin po letnih časih, ki so za najbližjo prihodnost večinoma nepomembne (Bertalanič et al., 2018).

4.3 Prostorske ugotovitve o točkih vžiga požarov v naravi in preverjanje točnosti zemljevidov nevarnosti in ranljivost

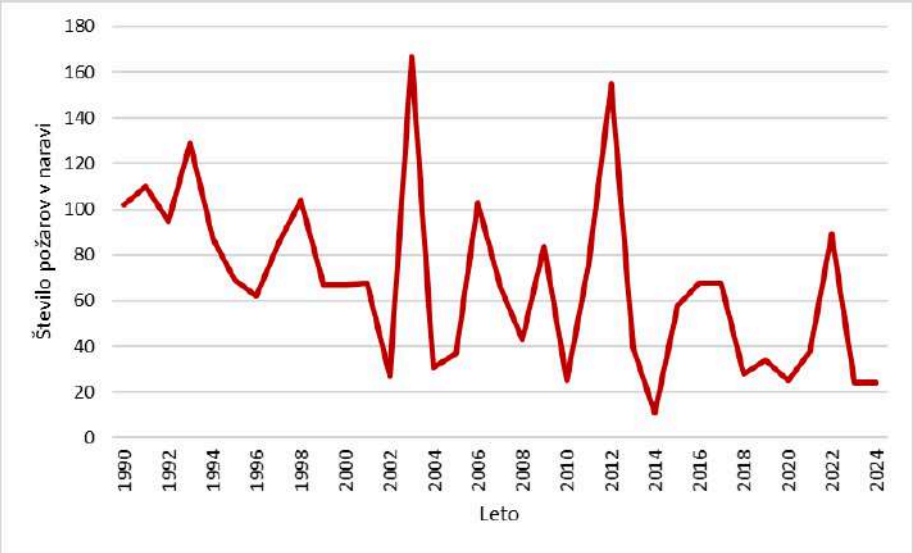
Požari v naravi lahko nastanejo na različne načine, tako zaradi naravnih kot človeških vzrokov. V stolpčnem diagramu (slika 8) je prikazan delež vzrokov požarov na območju Carso/Kras, pri čemer so splošni statistični podatki (siva barva) primerjani s podatki iz Italije (zelena barva) in Slovenije (modra barva). Največjo kategorijo predstavljajo neznani vzroki (neklasificirani), ki predstavljajo več kot polovico vseh primerov, pri čemer je delež v Italiji (65,8 %) večji kot v Sloveniji (34,1 %). Naključni (antropogeni) požari so pogostejši v Sloveniji (33,4 %) kot v Italiji (10,6 %), kar kaže na večji pojav požarov, ki jih povzroči človek, v tem delu regije. Nasprotno pa se naravni (strela) požari v obeh državah pojavljajo podobno pogosto, približno 17-19 %. Namerni požigi so sicer na splošno manj pogosti, vendar so v Sloveniji (18,1 %) v primerjavi z Italijo (4,5 %) izrazito pogostejši. Te razlike poudarjajo regionalne razlike v vzrokih za nastanek požara, na katere lahko vplivajo raba tal, ukrepi za preprečevanje požarov, družbeno-gospodarski dejavniki ter način evidentiranja podatkov o požarih. V Sloveniji so vzroki požarov razdeljeni v devet kategorij (*Evidenca Gozdnih Požarov*, 2024), medtem ko so v Italiji razdeljeni v štiri kategorije (RAFVG, 2024). Za lažjo primerjavo smo uporabili italijansko kategorizacijo vzrokov in v kategorijo »naključni (antropogeni)« združili naslednje kategorije za požare v Sloveniji: drugo (vojska, ipd.), gozdarska opravila, industrijska dejavnost, kmetijska opravila, komunikacije (vlaki, el. Vodi, ipd.) in obiskovalci gozda (turisti, otroci, ipd.).



Slika 8 Delež vzrokov požarov v naravi na preučevanem območju; primerjava splošnih statističnih podatkov (siva) s podatki iz Italije (zelena) in Slovenije (modra).

Graf časovnih nizov (slika 9) prikazuje število požarov v naravi na preučevanem območju od leta 1990 do leta 2024. Podatki kažejo na precejšnjo medletno spremenljivost, z izrazitimi viški števila požarov v naravi okoli let 1993, 1998, 2003, 2006 in 2013, ko je število incidentov preseglo 100. Ti viški večinoma ustrezajo ekstremnim vremenskim razmeram (tj. sušam in vročinskim valovom), ki so se v istih obdobjih pojavile na preučevanem območju (Sušnik et al., 2023).

Po letu 2014 je opazen splošen trend upadanja števila požarov v naravi, čeprav še vedno prihaja do nihanj. Majhno število dogodkov v zadnjih letih bi lahko pripisali boljšemu upravljanju požarov, strategijam preprečevanja ali podnebnim spremembam, ki zmanjšujejo požarno ugodne razmere. Vendar pa povečanje leta 2022 kaže, da tveganje za požare v naravi ostaja ciklično ter odvisno od okoljskih in antropogenih dejavnikov. Razumevanje teh nihanj je bistvenega pomena za prihodnje zmanjševanje tveganja požarov v naravi v regiji.

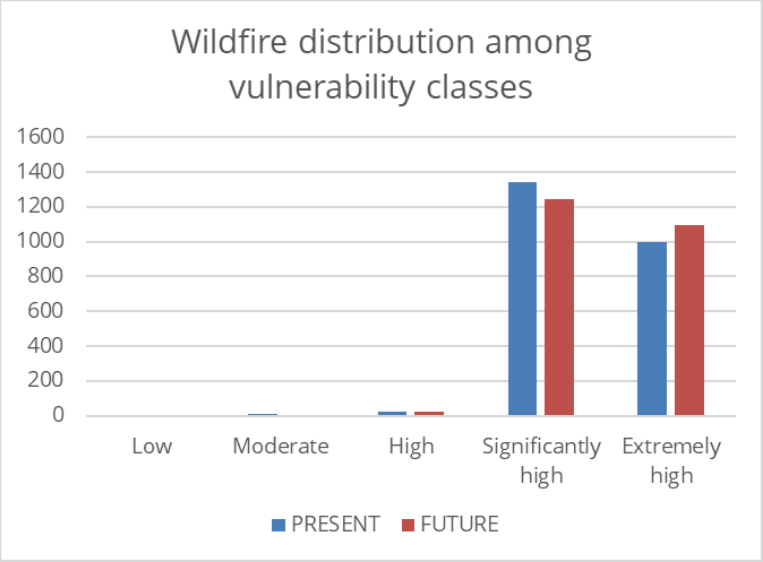


Slika 9 Število požarov v naravi na leto na preučevanem območju.

Analiza požarov v naravi (n = 2367) v povezavi z infrastrukturo in rabo zemljišč zagotavlja pomemben vpogled v vzorce pojavljanja požarov na preučevanem območju. Bližina infrastrukture ima pomembno vlogo pri nastanku požarov, pri čemer so najbolj kritični dejavnik ceste, gozdne ceste in pohodniške poti. V njihovi neposredni bližini (50-metrski pas) je nastalo 67,4 % (n = 1595) požarov. V povprečju je do požarov prišlo 52,52 m od cest. To kaže na tesno povezavo med požari in prometnim omrežjem. Ceste so lahko vir vžiga zaradi človekove dejavnosti (npr. odvržene cigaretni ogorki, iskre iz vozil). Poleg tega je 14,1 % požarov (n = 334) nastalo v 50-metrskem pasu od železnic, kar kaže na to, da imajo železnice, čeprav manjši vpliv kot ceste, še vedno pomembno vlogo pri nastanku požarov, najverjetneje zaradi iskrenja, ki ga povzročajo vlaki. Povprečna razdalja od železnic je bila veliko večja, 1 598,5 m, kar je posledica manj goste železniške mreže na preučevanem območju. Bližina naselij prav tako prispeva k nastanku požarov, saj je 16,2 % (n = 383) požarov nastalo v njihovem 50-metrskem pasu. Povprečna razdalja od naselij je bila 403,3 m.

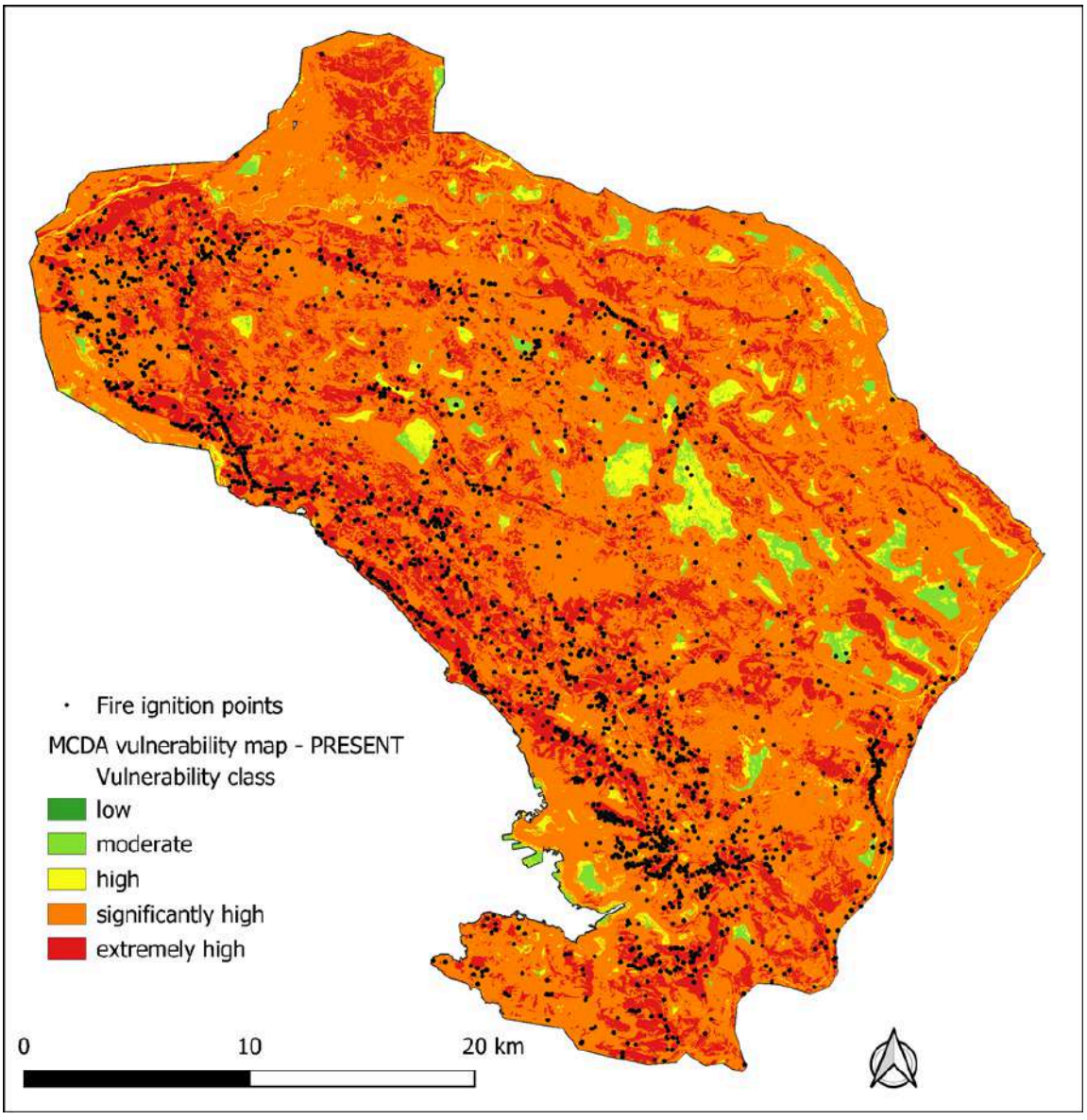
Požari so prevladovali v kategorijah rabe tal polnaravna in zaraščena območja (39,8 %) in listnati gozdovi (36,9 %). Sledile so jim kmetijske površine (9,4 %) in iglasti gozdovi (8,9 %). Na umetnih površinah (4,4 %) in drugih naravnih površinah (0,6 %) je bilo število požarov manjše, kar kaže na to, da so bili požari manj pogosti na urbaniziranih ali nevegetacijskih območjih. Na vodnih telesih (0,0 %) ni bilo požarov. Ocenili smo tudi natančnost verjetnosti požarne nevarnosti, tako da smo primerjali požare s kategorijami požarne nevarnosti. 41,3 % požarov je v kategoriji "izjemno visoka" požarna nevarnost, sledita ji kategoriji znatno visoka (21,7 %) in visoka (21,3 %). To potrjuje, da se zabeleženi pojavi požarov v naravi ujemajo z območji z največjo nevarnostjo, ki jih predvideva model.

Da bi potrdili MCDA, smo pridobljeno karto ranljivosti primerjali s točkami vžigov (slika 10). 41,3 % točk vžiga preteklih požarov pade v območja opredeljena z izjemno visoko ranljivostjo, sledijo območja znatno visoko (21,7 %) in visoko ranljivostjo (21,3 %), kar kaže, da je metoda MCDA pravilno določila območja, ki so bolj izpostavljena požarom v naravi. V sedanjih podnebnih razmerah se na območjih z znatno in izjemno visoko ranljivostjo nahaja 98,6 % preteklih požarov, v predvidenih prihodnjih podnebnih razmerah pa se ta delež poveča na 98,9 % (slika 10).



Slika 10 Razporeditev požarov v naravi med razredi ranljivosti za trenutno in prihodnje stanje.

Zemljevid ranljivosti smo primerjali s preteklimi požari (slika 11). Primerjava kaže, da se je 42 % preteklih lokacij vžiga nahajalo na območjih, ki so bila opredeljena kot izjemno ranljiva, 56 % pa na območjih, ki so bila opredeljena kot znatno ranljiva. Ta ugotovitev kaže, da je analiza ranljivosti natančno opredelila območja, ki so bolj izpostavljena požarom v naravi.



Slika 11 Zemljevid sedanje požarne ranljivosti v primerjavi s točkami vžiga preteklih požarov.

4.4 Poudarki in ugotovitve iz analiz nevarnosti in ranljivosti zaradi požarov v naravi

Zemljevidi verjetnosti nevarnosti in ranljivosti zaradi požarov v naravi se močno razlikujejo. Analiza ranljivosti je opredelila, da 93 % preučevanega območja spada v razreda znatno visoke in izjemno visoke ranljivosti. Medtem ko ta dva razreda predstavljata le 16 % celotnega preučevanega območja na karti verjetnosti nevarnosti. To je verjetno posledica porazdelitve preteklih požarov v naravi, uporabljenih za analizo MaxEnt, ki so zgoščeni v vidnih gručah. Posledično je bil nabor podatkov o preteklih požarih prečiščen z namenom zmanjšanja pristranskosti modela (z 2367 na 1206 lokacij). Zato se zdi, da je analiza MaxEnt primernejša za kartiranje nevarnosti, pri čemer se ugotavlja verjetnost pojava požarov v naravi. Po drugi strani pa MCDA enakomerno porazdeli območja velikega tveganja po celotnem preučevanem območju, pri čemer ugotavlja statično ranljivost območja za požare v naravi in nakazuje možna območja širjenja požarov v naravi.

Poleg tega je ena od glavnih razlik med obema metodama v prihodnji projekciji verjetnosti požarne ogroženosti in požarne ranljivosti. V analizi ranljivosti naj bi se območja z izjemno visoko ranljivostjo povečala s 25 % na 30 % celotnega območja, medtem ko je analiza verjetnosti nevarnosti pokazala splošno zmanjšanje verjetnosti požarov v naravi v skladu s prihodnjim podnebnim scenarijem. To je verjetno posledica dejstva, da sta spremenljivki temperatura in padavine po AHP imeli težo 4,32 % in 1,44 %, pri čemer je temperatura trikrat bolj vplivala na končno ranljivost, medtem ko je analiza nevarnosti na podlagi MaxEnta pripisala temperaturi in padavinam prispevek 2,8 % in 7,0 %. Obe spremenljivki naj bi se v prihodnjih projekcijah povečali, vendar imata vsaka nasprotni učinek na ranljivost. Glede na to, katera od teh dveh spremenljivk prevladuje v posameznem pristopu modeliranja, bodo rezultati nasprotujoči.

Ta razlika kaže na to, da sta oba pristopa učinkovita orodja za kartiranje verjetnosti in ranljivosti požarov v naravi, vendar se osredotočata na različne značilnosti. Njuno uporabo za analizo požarov v naravi bi zato lahko kar najbolj povečali z dopolnjevanjem rezultatov in ne s primerjanjem enega z drugim.

Modeliranje Maxent je z odzivnimi krivuljami omogočilo pomemben vpogled, ki je pokazal, da je verjetnost požarne nevarnosti največja na južnih in jugozahodnih pobočjih, na polnaravnih in iglastih gozdnih območjih ter na območjih z zmernimi padavinami in nakloni. Verjetnost požarne nevarnosti je bila tudi močno negativno povezana z oddaljenostjo od cest, železnic in naselij, kar poudarja ključno vlogo infrastrukture pri vžigu požarov v naravi.

5 ZAKLJUČKI

Model požarne nevarnosti se je izkazal za uspešnega s povprečno vrednostjo AUC 0,754 (± 0,014), kar presega prag 0,75 za statistično uspešnost. Model je kot najbolj vplivno napovedno spremenljivko opredelil oddaljenost od cest, sledita raba tal in oddaljenost od železnic, kar poudarja pomembno vlogo antropogenih dejavnikov pri verjetnosti nevarnosti požarov v naravi. Topografske spremenljivke, kot so ekspozicija, TPI in TWI, so k modelu prispevale najmanj. Modeliranje nevarnosti požarov v naravi je omogočilo obdelavo in podrobno analizo podatkov o pojavu, ki so na voljo le v obliki prisotnosti. Poleg tega pa je omogočilo tudi izdelavo odzivnih krivulj za vsako spremenljivko, kar je še posebej pomembno za razumevanje vplivov na nevarnost zaradi požarov v naravi. Primerjava z opazovanimi podatki o preteklih požarih je potrdila usklajenost z območji z največjo nevarnostjo, kar potrjuje zanesljivost modela.

Podobno je analiza ranljivosti omogočila pravilno opredelitev območij z znatno visoko in izjemno visoko ranljivostjo, ki skupaj predstavljajo 98,6 % vseh preteklih požarov v naravi. Najbolj vplivni dejavnik je bila ponovno oddaljenost od cest, sledila pa je pokritost tal.

Prostorska analiza na podlagi MaxEnta je pokazala, da območja z veliko požarno nevarnostjo prevladujejo v obalnem delu in v bližini večjih naselij, kjer je mreža antropogene infrastrukture največja. Velik delež požarov (67,4 %) je izbruhnil v oddaljenosti manj kot 50 metrov od cest, 14,1 % v bližini železnic in 16,2 % v bližini naselij. Požari so bili najpogostejši na polnaravnih in zaraščenih območjih (39,8 %) ter v listnatih gozdovih (36,9 %), kar poudarja pomen razpoložljivosti goriva.

Kljub temu, da sta bili analizi izvedeni z enakimi vhodnimi spremenljivkami, sta se znatno razlikovali v razporeditvi območij visokih vrednostnih razredov:

- Analiza ranljivosti je 93 % obravnavanega območja opredelila kot območja z znatno in izredno visoko ranljivostjo.

- Nasprotno pa ta dva razredi na zemljevidu verjetnosti nevarnosti predstavljata le 16 % celotnega obravnavanega območja.

Analiza nevarnosti se bolj osredotoča na verjetnost nastanka požara v naravi, ki je povezana s točkami pojavljanja požarov v preteklosti, medtem ko analiza ranljivosti enakomerno razporeja razrede visokega tveganja po celotni regiji na podlagi statičnih spremenljivk, ki vplivajo na požarno ranljivost.

Poleg tega pa naj bi se v skladu s klimatskimi projekcijami za obdobje 2011-2040:

- Območja z izredno visoko ranljivostjo povečala za 5 % celotne površine,

- medtem ko je modeliranje verjetnosti nevarnosti napovedalo, da se bo splošna nevarnost požarov zmanjšala.

To je verjetno posledica različnih uteži, ki jih imajo spremenljivke temperature in padavin. Dejstvo je, da klimatske spremenljivke, uporabljene v tej študiji, upoštevajo letno povprečje temperature in kumulativno letno količino padavin. Ta vidik je šibka točka študije, saj ne omogoča prepoznavanja razlik med letnimi časi.

Na splošno rezultati zagotavljajo trdno podlago za oblikovanje prihodnjih strategij za zmanjševanje tveganja za požare v naravi. Uporaba topografskih spremenljivk, pridobljenih na podlagi LiDAR podatkov, je izboljšala natančnost napovednih dejavnikov, povezanih s terenom, čeprav so antropogeni dejavniki ostali prevladujoči. Obe analizi se dopolnjujeta in ponujata različne poglede na dejavnike, povezane s tveganjem za požare v naravi na preučevanem območju, ter možne vpoglede za učinkovito upravljanje. Nenazadnje je ta študija utrla pot za nadaljnje analize za oceno izpostavljenosti tveganja zaradi požarov v naravi, npr. vključno z okoljsko in družbeno-ekonomsko občutljivimi območji.

6 VIRI

Blitch, W., Sovie, A., & Tobin, B. (2023). Predictive modeling of cave entrance locations: Relationships between surface and subsurface morphology. *International Journal of Speleology*, *52*(2), 101–108. https://doi.org/10.5038/1827-806X.52.2.2455

Brown, J. L. (2014). SDMtoolbox: A python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses. *Methods in Ecology and Evolution*, *5*(7), 694–700. https://doi.org/10.1111/2041-210X.12200

Brun, P., Zimmermann, N. E., Hari, C., Pellissier, L., & Karger, D. N. (2022). *CHELSA-BIOCLIM+ A novel set of global climate-related predictors at kilometre-resolution* (Versione 1.0) [Geotiff,PDF]. EnviDat. https://doi.org/10.16904/ENVIDAT.332

Djabri, A. D., Bouhata, R., Guellouh, S., & Bensekhria, A. (2024). Wildfire Vulnerability Assessment and Mapping Using Remote Sensing, GIS and Weighted Overlay Method in the Eastern Aures in Khenchela, Algeria. *Geoadria*, *28*(2), 191–210. https://doi.org/10.15291/geoadria.4218

Dupuy, J., Fargeon, H., Martin-StPaul, N., Pimont, F., Ruffault, J., Guijarro, M., Hernando, C., Madrigal, J., & Fernandes, P. (2020). Climate change impact on future wildfire danger and activity in southern Europe: A review. *Annals of Forest Science*, *77*(2), 35. https://doi.org/10.1007/s13595-020-00933-5

Evidenca gozdnih požarov. (2024). [Dataset]. Zavod za gozdove Slovenije. https://prostor.zgs.gov.si/pregledovalnik/

Gigović, & Jakovljević. (2018). GIS Multi-Criteria Analysis for Identifying and Mapping Forest Fire Hazard: Nevesinje, Bosnia and Herzegovina. *Tehnicki Vjesnik - Technical Gazette*, *25*(3). https://doi.org/10.17559/TV-20151230211722

Goleiji, E., Hosseini, S. M., Khorasani, N., & Monavari, S. M. (2017). Forest fire risk assessment-an integrated approach based on multicriteria evaluation. *Environmental Monitoring and Assessment*, *189*(12), 612. https://doi.org/10.1007/s10661-017-6225-7

Karger, D. N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W., Zimmermann, N. E., Linder, H. P., & Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data*, *4*(1), 170122. https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122

Kim, S. J., Lim, C.-H., Kim, G. S., Lee, J., Geiger, T., Rahmati, O., Son, Y., & Lee, W.-K. (2019). Multi-Temporal Analysis of Forest Fire Probability Using Socio-Economic and Environmental Variables. *Remote Sensing*, *11*(1), 86. https://doi.org/10.3390/rs11010086

Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, *20*(7), 703–726. https://doi.org/10.1080/13658810600661508

Maniatis, Y., Doganis, A., & Chatzigeorgiadis, M. (2022). Fire Risk Probability Mapping Using Machine Learning Tools and Multi-Criteria Decision Analysis in the GIS Environment: A Case Study in the National Park Forest Dadia-Lefkimi-Soufli, Greece. *Applied Sciences*, *12*(6), 2938. https://doi.org/10.3390/app12062938

Merow, C., Smith, M. J., & Silander, J. A. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, *36*(10), 1058–1069. https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x

Mishra, B., Panthi, S., Poudel, S., & Ghimire, B. R. (2023). Forest fire pattern and vulnerability mapping using deep learning in Nepal. *Fire Ecology*, *19*(1), 3. https://doi.org/10.1186/s42408-022-00162-3

Paudel, G., Pandey, K., Lamsal, P., Bhattarai, A., Bhattarai, A., & Tripathi, S. (2024). Geospatial forest fire risk assessment and zoning by integrating MaxEnt in Gorkha District, Nepal. *Heliyon*, *10*(11), e31305. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31305

Phillips, S. J. (2017). *A Brief Tutorial on Maxent* (p. 39). http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/

Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, *190*(3–4), 231–259. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026

Phillips, S. J., & Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: New extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, *31*(2), 161–175. https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x

Phillips, S. J., Dudík, M., Elith, J., Graham, C. H., Lehmann, A., Leathwick, J., & Ferrier, S. (2009). Sample selection bias and presence-only distribution models: Implications for background and pseudo-absence data. *Ecological Applications*, *19*(1), 181–197. https://doi.org/10.1890/07-2153.1

RAFVG - DC production, trade, cooperation, agricultural and forest resources – Regional Forestry Corps Service. (2024). *Fire beginning point* [Dataset].

Saaty, T. l. (2002). *DECISION MAKING WITH THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS*. *9*(3), 215–229.

Sivrikaya, F., & Küçük, Ö. (2022). Modeling forest fire risk based on GIS-based analytical hierarchy process and statistical analysis in Mediterranean region. *Ecological Informatics*, *68*, 101537. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101537

Sušnik, A., Vlahović, Ž., Moderc, A., & Habič, B. (2023). *Prilagajanje podnebnim spremembam. [PP14] Kmetijske suše*. Agencija RS za okolje. https://kazalci.arso.gov.si/sl/content/kmetijske-suse-0

Vilar, L., Gómez, I., Martínez-Vega, J., Echavarría, P., Riaño, D., & Martín, M. P. (2016). Multitemporal Modelling of Socio-Economic Wildfire Drivers in Central Spain between the 1980s and the 2000s: Comparing Generalized Linear Models to Machine Learning Algorithms. *PLOS ONE*, *11*(8), e0161344. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161344

Yang, X., Jin, X., & Zhou, Y. (2021). Wildfire Risk Assessment and Zoning by Integrating Maxent and GIS in Hunan Province, China. *Forests*, *12*(10), 1299. https://doi.org/10.3390/f12101299

Interreg Italia-Slovenija
Karst Firewall 5.0

Cofinanziato dall'Unione europea
Sofinancira Evropska unija

COLOPHON / KOLOFON

Editore / Založnik:
Servizio/agenzia di traduzione / Prevajalska služba/agencija:
Redazione / Uredništvo:
Crediti fotografici / Avtorstvo fotografij:
Stampa / Tisk:
Dati dell'edizione / Podatki o izdaji:
Luogo e data di pubblicazione / kraj in datum izdaje:

La presente pubblicazione è reperibile in formato elettronico all'indirizzo: www... /
To objavo lahko najdete v elektronski obliki na naslovu: www...

Il contenuto della presente pubblicazione non rispecchia necessariamente le posizioni ufficiali dell'Unione europea. La responsabilità del contenuto della presente pubblicazione appartiene all'autore [inserire nome dell'autore] / Vsebina te publikacije ne odraža nujno uradnih stališč Evropske unije. Odgovornost za vsebino te publikacije pripada avtorju [vstaviti avtorjevo ime]