

POVEZANOST RAZPOREDITVE JAMSKIH VHODOV IN MIKRORELIEFNIH ZNAČILNOSTI KRAŠKEGA POVRŠJA: PRIMER SLOVENSKEGA DINARSKEGA KRASA

Špela Čonč, dr. Jure Tičar

Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti, Geografski inštitut Antona Melika
spela.conc@zrc-sazu.si, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2110-8542>
jure.ticar@zrc-sazu.si, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3567-8084>

DOI: https://doi.org/10.3986/9789610508885_02

UDK: 911.2:551.435.8(497.4)

528.8.044.6(497.4)

IZVLEČEK

Povezanost razporeditve jamskih vhodov in mikroreliefnih značilnosti kraškega površja: primer slovenskega dinarskega krasa

Za kras, ki pokriva 49,7 % površja Slovenije, je značilna velika geodiverzitetna površinskih in podzemnih reliefnih oblik kot so kopaste vzpetine, vrtače, uvale, polja in jame. Zaradi tega je kras znan tudi kot eden najbolj razgibanih geomorfoloških sistemov na našem planetu. Razgibanost, razčlenjenost in kamnitost površja lahko nakazuje na tektonsko delovanje in pretrtost kamninskih skladov, kar predstavlja predpogoje za razvoj jam. Jame v krasu najpogosteje nastajajo ob tektonskih prelomnih conah, kjer razmaknitve skladov ustvarjajo nezveznosti v kamninah. Pri določanju morfoloških značilnosti površja si lahko pomagamo s številnimi (pol-)avtomatskimi metodami za izračun značilnosti površja ali prepoznavanje reliefnih oblik. Glavna cilja te študije sta, da na podlagi visoko resolucijskega (1 m × 1 m) LiDAR digitalnega modela višin določimo mikroreliefne značilnosti neposredne okolice jamskih vhodov (v nadaljevanju jam) ter, da na podlagi pristopa ekološkega modeliranja (»use-availability approach«) in statistične analize ugotovimo katere mikroreliefne značilnosti so pomembno povezane z njihovim pojavljanjem. Rezultati kažejo na to, da se jame pogosteje pojavljajo v bližini izdankov kamnin in vrtač, na bolj kamnitih območjih in na območjih z nižjimi vrednostmi topografskega pozicijskega indeksa (TPI), kot je to značilno za preučevano območje. Kažejo pa se razlike med pojavljanjem v različnih litoloških enotah.

KLJUČNE BESEDE

GIS, LiDAR, geomorfologija, jame, ekološko modeliranje, prostorska analiza, Dinarsko gorovje

ABSTRACT

The relationship of the distribution of cave entrances and the micro-relief characteristics of the karst surface: the example of the Slovenian Dinaric karst

Karst, covering 49.7% of Slovenian surface, is characterised by high geodiversity of surface and sub-surface landforms, such as conical hills, dolines, uvalas, poljes, and caves. Due to this karst is also known as one of the most rugged geomorphological systems on the planet. Surface ruggedness, fragmentation and rockiness may indicate tectonic activity and bedrock fractures, which are the preconditions for the cave development. Caves in karst are most often formed along joints of tectonic origin causing discontinuities in rocks. Many (semi-)automatic methods for calculating surface characteristics or identifying landforms can be used to determine the morphological characteristics of the surface. The main objectives of this study were to use a high-resolution (1m × 1m) LiDAR digital elevation model to determine the micro-relief characteristics of the vicinity of the cave entrances (hereafter caves), and to identify which micro-relief characteristics are significantly related to their occurrence based on an ecological modeling

approach (use-available) and statistical analysis. The results show that caves are more likely to occur near rocky outcrops and dolines, in rockier areas and in areas with lower Topographic Position Index (TPI) values than is typical for study areas. However, we observed differences between the occurrences in different lithological units.

KEY WORDS

GIS, LiDAR, geomorphology, caves, ecological modeling, spatial analysis, Dinaric mountains

1 Uvod

Kras je tip površja, ki ga opredeljujeta kamnitost in pestrost površinskih ter podzemeljskih reliefnih oblik. Območje lahko opredelimo kot kraško oziroma zakraselo, kadar prevladuje odnašanje snovi v raztopini, navpičen odtok padavinskih voda, akumulacija raztopljenega materiala pa je zanemarljiva (Ford in Williams 2007; Veress 2020). V Sloveniji kras pokriva 49,7 % celotnega ozemlja, od tega je približno 50 % krasa razvitega v apnencih in 25 % krasa v dolomitih, ki sta prostorsko najbolj razširjena na območju makroregije Dinarsko gorovje (Gostinčar in Stepišnik 2023). Kot posledica različne litologije in dinamike mehanskega preperevanja kamnin, ki gradijo slovenski Dinarski kras (npr. apnec, dolomit), kraško površje poleg vrtač, udornic, kraških polj in drugih tipičnih kraških reliefnih oblik razčlenjujejo tudi številne manjše reliefne oblike. Na območjih golega in polgolega krasa na kamninah nastajajo oblike v velikosti od nekaj milimetrov do več deset metrov (Gams 2004; Stepišnik 2020). Na (pol)golem krasu so poleg škvavic, kotličev, škrapelj in ostalih mikroreliefnih oblik pogoste tudi škraplje in škrapljišča, skalni bloki ter skalni samotarji (Gams 2004; Stepišnik 2020). Golo kamnino in druge skalne oblike, ki so razkrite na površju, lahko imenujemo tudi izdanki kamnin. Nastanejo z erozijo okoliškega materiala oz. preperine, ki je mehansko manj odporna (Twidale 2020). Za izdanke kamnin, ki nastajajo v različnih tipih kamnin in so pestrih oblik ter velikosti, je značilen predvsem velik naklon, prostorska izoliranost, v številnih primerih pa predstavljajo nedotaknjene naravne habitate (Fitzsimons in Michael 2017; Čonč s sodelavci 2024). Zaradi številčnosti in gostote najrazličnejših mikro- in mezoreliefnih kraških oblik, ki razčlenjujejo površje, lahko kras opredelimo tudi kot enega najbolj kamnitih in razgibanih geomorfoloških sistemov na našem planetu (Day in Chenoweth 2013).

Za preučevanje morfografskih in morfometričnih značilnosti reliefnih oblik ter za potrebe interpretacije morfogeneze območij, so prostorski podatki o posameznih reliefnih oblikah ključnega pomena. Posledično se na področju daljinskega zaznavanja razvijajo številne metode, ki omogočajo časovno, stroškovno in finančno učinkovito identifikacijo ter kartiranje reliefnih oblik (Čonč s sodelavci 2022). Natančno lasersko skeniranje površja omogoča preučevanje reliefa tudi pod vegetacijo, kar je še posebej uporabno pri analizi večjih, oddaljenih, z vegetacijo poraslih in težko dostopnih območjih, kot je Dinarsko gorovje (Triglav Čekada 2011; Čonč s sodelavci 2022). Pri preučevanju reliefnih značilnosti si lahko pomagamo s številnimi metodami za vizualizacijo digitalnih modelov višin (npr. senčenje, vizualizacija na podlagi Sky-view faktorja ali Red relief image) ali z izračuni različnih kazalnikov kot so na primer naklon, razgibanost površja in topografski pozicijski indeks (Weiss 2001; Sappington, Longshore in Thompson 2007; Chiba, Kaneta in Suzuki 2008; Zakšek, Oštir in Kokalj 2011; Hrvatini in Perko 2012). Medtem ko je večje okroglaste reliefne oblike, kot so vrtače in kopasti vrhovi, mogoče zaznati z obstoječimi metodami daljinskega zaznavanja (npr. Bauer 2015; Mihevc in Mihevc 2021; Stefanovski in Repe 2021; Telbisz 2021; Čonč s sodelavci 2022; Stefanovski s sodelavci 2024), predstavlja prepoznavanje manjših reliefnih oblik, predvsem zaradi raznolikosti oblik in velikosti, izziv za avtomatizirano zaznavanje. Čonč s sodelavci (2024) je razvila pristop zaznavanja izdankov kamnin, ki temelji na podlagi identifikacije konveksnih oblik (grebenov) in naklona, ter ga uporabila pri preučevanju ekološke evrazijskega risa na dveh reliefno različnih območjih.

Namen tega prispevka je ugotoviti ali obstaja povezava med mikroreliefnimi značilnostmi površja in pojavljanjem jamskih vhodov (v nadaljevanju jam). Glavna cilja tega prispevka sta: 1) na podlagi visoko resolucijskega (1 m × 1 m) LiDAR digitalnega modela višin (DMV) in obstoječih slojev določiti mikroreliefne značilnosti neposredne okolice jam, ter 2) na podlagi pristopa ekološkega modeliranja (*»use-availability approach«*; Johnson 1980) in statistične analize ugotoviti katere mikroreliefne značilnosti so pomembno povezane z njihovim pojavljanjem. Uporaba metod za ekološko modeliranje (npr. *MaxEnt*) se je že izkazala kot uspešna pri razumevanju prostorskih vzorcev naravnih virov in napovedovanju prostorske razširjenosti naravnih pojavov (Valavi s sodelavci 2022; Blitch s sodelavci 2023).

2 Preučevano območje

Glede na geološko raznolikost kraških območij v Sloveniji, je posledično razvitih več tipov krasa, kar se odraža tudi v veliki raznolikosti površinskih ter podzemnih kraških oblik (Gams 2004; Zupan Hajna 2004; Zorn s sodelavci 2020). Že na manjših območjih, kjer se pojavljajo različne kamnine se pojavnost in gostota reliefnih oblik pomembno razlikuje (npr. Hrvatini 2016; Čonč s sodelavci 2022; 2024).

Kot območje preučevanja smo izbrali slovenski Dinarski kras, z izjemo Trnovskega Gozda, Nanoške in Hrušiške planote (slika 1). Širše gledano območje pripada Dinarskemu gorstvu, oziroma delu gorstva, ki ga z geološkega vidika imenujemo tudi Zunanji Dinaridi oziroma Dinarski kras, saj na njem prevladuje kraški tip reliefa (Mihevc, Prelovšek in Zupan Hajna 2010; Zorn s sodelavci 2020). Za Dinarski kras je značilna globoka vadozna cona, kamnitost in razčlenjenost površja. Osrednji del slovenskega Dinarskega krasa gradijo predvsem mezozojske in kvartarne kamnine, med katerimi prevladujeta apnenec in dolomit. Za to območje so značilne predvsem visoke kraške planote, razčlenjene s številnimi podolji, kraškimi polji in ravniki, ki potekajo v značilni dinarski smeri (od severozahoda proti jugovzhodu). Proti jadranski obali se nadmorska višina znižuje, med območji apnenca pa se pojavljajo pasovi eocenskega fliša (Mihevc, Prelovšek in Zupan Hajna 2010; Zorn s sodelavci 2020). Najbolj značilne reliefne oblike globokega krasa so kraške kotanje različnih dimenzij (npr. vrtače, udornice, brezstropne jame), območje pa je preprejeno tudi s številnimi jamami.

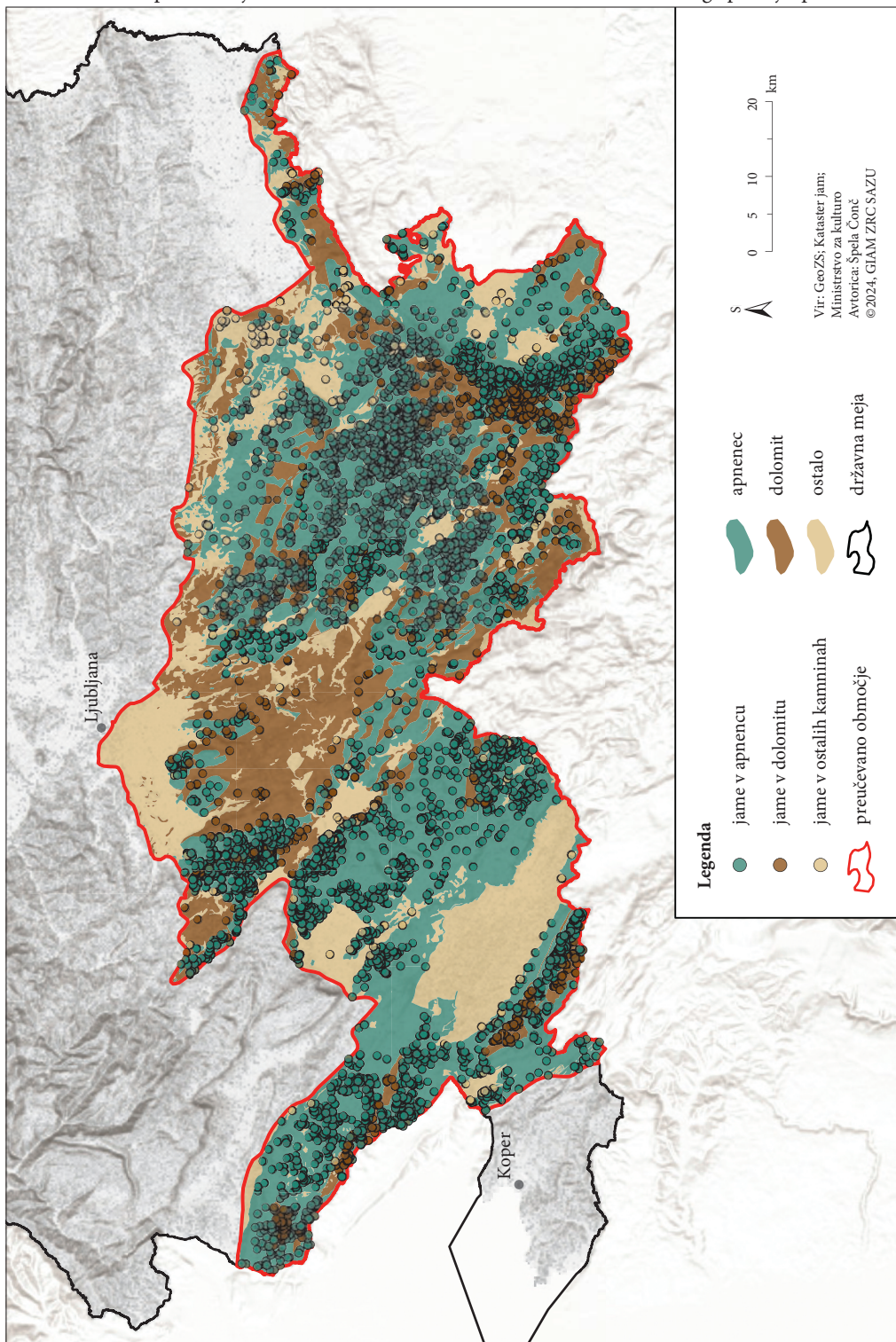
Razgibanost, razčlenjenost in kamnitost površja lahko z geomorfološkega vidika nakazuje na tektonsko delovanje in pretrtost kamninskih skladov, kar predstavlja pogoje za razvoj jam. Jame v krasu najpogosteje nastajajo ob tektonskih prelomnih conah, kjer razmaknitve skladov ustvarjajo nezveznosti v kamninah (pore, lezike, razpoke, kanali in prelomi), po katerih se padavinska voda pretaka v podzemlje in s korozijo nezveznosti tudi širi (Gams 2004; Ford in Williams 2007; Čar 2018; Stepišnik 2020).

Razvojno so jame opredeljene kot naravne votline v kamnini, ki jih je oblikovala voda z raztapljanjem. Jame so vse votline, ki so širše od 5 do 15 mm, kar je najmanjša širina za vzpostavitev turbulentnega toka skozi vodonosnik, ki pospeši raztapljanje (Ford in Williams 2007). Z antropocentričnega vidika so jame naravne votline v kamnini, ki so prehodne za človeka (Gams 2004; Ford in Williams 2007; Palmer 2007). Podobno opredelitev imata tudi Jamarska zveza Slovenije (2014) ter Zakon o varstvu podzemnih jam (2004): »Podzemna jama po tem zakonu (v nadaljnjem besedilu: jama) je na naravni način nastali prostor v kamnini, ki je v zunanji prostor zaključen z navpično projekcijo roba pokritega dela jame, ali brezno z vhodno depresijo od tam, kjer naklon pobočja preseže 30 stopinj in katerega prehodni del je daljši ali globlji od 10 m, ne glede na to, ali je vhod oziroma izhod (v nadaljnjem besedilu: vhod) naraven ali je plod človekovega dela. Jame so votline, razpoke, brezna in podzemni rovi in so lahko suhe ali stalno ali občasno, deloma ali v celoti zalite z vodo. Ne glede na določbo prejšnjega odstavka se lahko zaradi morfoloških, hidroloških, favnističnih ali drugih posebnosti določi za jamo tudi prostor iz prejšnjega odstavka, ki je krajši od 10 m«.

Po podatkih Katastra jam (2024) je bilo v Sloveniji do sredine leta 2022 (4. 7. 2022) registriranih 14.853 kraških jam. Skupna dolžina vseh je 1.126.295 m oziroma povprečno 75,8 m na jamo, skupna globina pa 353.039 m oziroma 23,7 m na jamo. Med petimi najdaljšimi jamami so Sistem Mígovec (kat. št. 6001) z dolžino 43,0 km, Postojnska jama (kat. št. 747) z dolžino 24,1 km, Kačna jama (kat. št. 955) z dolžino 20,2 km, Črnelško brezno (kat. št. 6040) z dolžino 20,1 km in Predjamski sistem (kat. št. 734) z dolžino 17,8 km. Med petimi najglobljimi brezni so Čehi 2 (kat. št. 6200) z globino –1505 m, Črnelško brezno (kat. št. 6040) z globino –1393 m, Renejevo brezno (kat. št. 7090) z globino –1322 m, Sistem Mala Boka – BC4 (kat. št. 3200) z globino –1319 m in Vandima (kat. št. 6452) z globino –1182 m.

Slika 1: Zemljevid preučevanega območja s prostorsko razporeditvijo jam, ki smo jih upoštevali v analizi, glede na poenostavljeno litološko zgradbo. ► (str. 27)

Povezanost razporeditve jamskih vhodov in mikroreliefnih značilnosti kraškega površja: primer ...



3 Metode in podatki

Za analizo mikroreliefnih značilnosti neposredne okolice jam smo uporabili različne spremenljivke, ki temeljijo na izračunih ali obdelavi že obstoječih podatkov. Podatke o jamah smo pridobili iz zbirke podatkov Katastra jam (2024). Do leta 2003 so bile lokacije jamskih vhodov beležene le na podlagi zemljevidov s slabšimi merili, posledično pa so bile lege številnih jam netočne. V zadnjih dveh desetletjih so zaradi uveljavljanja novih tehnologij opazne izboljšave v natančnosti leg jam (Čekada in Gostinčar 2016; Tičar in Čekada 2018), zato smo v analizi uporabili le tiste jame, katerih lega je bila prostorsko potrjena na podlagi GPS, GPS-RTK, LiDAR-ja ali teodolitske metode (Kataster jam 2024). Na podlagi posplošene litološke zgradbe smo jame razdelili v tri razrede: jame v apnencu, jame v dolomitu in jame v ostalih kamninah. Med jamami, ki smo jih opredelili kot jame v ostalih kamninah, prevladujejo predvsem ponorne in izvirne jame na območju kontaktnega krasa (slika 1). V tem razredu se nahajajo predvsem zaradi nenatančnosti geološke karte, saj so dejanski jamski vhodi oblikovani v apnencu ali dolomitu, na geološki karti pa so to območja označena kot območja aluvialnih nanosov ali flišnih sedimentov. Nekateri jamski vhodi pa so oblikovani tudi v karbonatnem grušču, glinah, peskih in laporjih.

V študiji smo uporabili pet izbranih spremenljivk (preglednica 1), ki se na mikro nivoju nanašajo na izoblikovanost površja in oddaljenost jam od izbranih reliefnih oblik: razdalja do izdankov kamnin, kamnitost površja, razdalja do (roba) vrtač, topografski pozicijski indeks (TPI) in razgibanost površja (*Vector Ruggedness Measure*; VRM). Evklidske razdalje od jam do izdankov kamnin in vrtač so bile izračunane z orodjem *Near*. Za izračun razdalje do izdankov kamnin in kamnitosti površja v neposredni okolici jam (radij 10 m; orodje *Zonal statistics as table*) smo uporabili sloj, ki so ga izdelali Čonč s sodelavci (2024). Za izračun razdalje do vrtač smo uporabili sloj, ki ga je izdelal Stefanovski s sodelavci (2024). TPI (Weiss 2001) smo izračunali tako, da smo vhodni digitalni model višin (DMV) povprečili z orodjem *Focal Statistics* (parametri: *Neighborhood = Circle*, *Radius = 10 m*, *Statistic type = Mean*) in ga nato z *Raster Calculator* odšteli od vhodnega DMV. VRM (Sappington, Longshore in Thompson 2007) smo izračunali z orodjem oz. skripto *Vector Ruggedness Measure*, ki je na voljo v okviru paketa *Arc Hydro Tools Pro*. Pri izračunu TPI in VRM smo kot vhodni podatek uporabili LiDAR DMV z ločljivostjo celice 1×1 m, ki je v obliki podatkovnega oblaka točk tal prosto dostopen na spletni strani Agencije Republike Slovenije za okolje (Triglav Čekada in Bric 2015). Spremenljivke, ki so opredeljene kot razdalja (oddaljenost do izdankov kamnin in vrtač) smo razdelili v šest razredov (preglednica 1). TPI smo razdelili glede na vrednosti, ki jih predlaga Weiss (2001). Za VRM (razgibanost) in kamnitost površja pa smo uporabili razdelitev glede na Jenksove naravne razrede in vrednosti razdelili v pet razredov (preglednica 1).

Za primerjavo reliefnih značilnosti neposredne okolice jam s splošnimi značilnostmi površja preučevanega območja, smo uporabili pristop ekološkega modeliranja, ki temelji na primerjavi preučevanih lokacij z lokacijami, ki so na območju »na voljo« (*use-availability approach*; Johnson 1980). Na vsaki litološki enoti smo z orodjem *Create Random Points* ustvarili naključne točke. Število naključnih točk je na vsaki litološki enoti enako številu jam v isti enoti. Jamam in naključnim točkam smo pripisali vrednosti izbranih spremenljivk. Prostorske analize smo izvedli z ESRI-jevo programsko opremo *ArcGIS Pro 3.0.3* (ESRI, Redlands, CA, USA).

Da bi ugotovili katere spremenljivke pomembno vplivajo na pojavljanje jam, smo podatke statistično obdelali s programskim orodjem R (R Core Team, Vienna, Austria). V okviru paketa »lme4« v.1.1-30 (Bates s sodelavci 2015) smo sestavili modele logistične regresije z binarno odvisno spremenljivko (0 = naključna točka, 1 = jama). Pred modeliranjem smo z metodo faktorja inflacije variance (*variance inflation factor*; VIF) preverili ali med spremenljivkami prihaja do korelacije. V analizi smo obdržali le tiste spremenljivke, ki so imele vrednost VIF nižjo od 3 (Zuur, Ieno in Elphick 2010). Prav tako smo pred modeliranjem, z namenom izboljšanja delovanja modelov, razmernostne spremenljivke standardizirali na z-vrednosti tako, da smo od konkretnih enot odšteli njihovo povprečje in jih delili z dvema

Preglednica 1: Vrednosti razredov za spremenljivke: razdalja do izdankov kamnin in razdalja do vrtač, topografski pozicijski indeks (TPI), razgibanost površja (Vector Ruggedness Measure; VRM) in kamnitost površja.

| razred | razdalja (m) | TPI | VRM | kamnitost (m ²) |
|--------|-----------------------------|--|------------------------------|--------------------------------|
| 1 | ≤ 10 (zelo majhna) | ≤ -1 (dolina/depresija) | ≤ 0,03 (zelo nizka) | ≤ 14,6 (zelo nizka) |
| 2 | 10 ≤ 20 (majhna) | -1 ≤ -0,5 (ravnina/spodnje pobočje) | 0,03 ≤ 0,10 (nizka) | 14,6 ≤ 46,4 (nizka) |
| 3 | 20 ≤ 30 (srednja) | -0,5 ≤ 0,5 (srednje pobočje) | 0,10 ≤ 0,20 (srednja) | 46,4 ≤ 89,7 (srednja) |
| 4 | 30 ≤ 40 (srednje velika) | 0,5 ≤ 1 (zgornje pobočje) | 0,20 ≤ 0,34 (velika) | 89,7 ≤ 145,4 (velika) |
| 5 | 40 ≤ 50 (velika) | > 1 (greben) | 0,34 ≤ 0,77 (zelo velika) | 145,4 ≤ 265,7 (zelo velika) |
| 6 | > 50 (zelo velika) | / | / | / |

standardnima odklonoma (Gelman 2008). Za modele smo podali Akaike informacijski kriterij (Akaike information criteria; AIC) in za vsak model izračunali razliko do ničelnega modela (ΔAIC). Ničelne modele smo vključili za preverjanje pomembnosti izbranih spremenljivk. Za oceno ustreznosti modelov smo uporabili metodo navzkrižnega preverjanja (*»k-fold cross-validation«*; Boyce s sodelavci 2002). Podatke smo razdelili na podvzorci v razmerju 80 % : 20 % in postopek ponovili petkrat. Za oceno razmerij med rangi modelov in rangi podvorcev podatkov smo uporabili Spearmanov koeficient korelacije, kjer se od dobro delujočih modelov pričakuje visoka vrednost korelacije ($\rho > 0,80$; Boyce s sodelavci 2002).

4 Rezultati

4.1 Jame

Da bi ugotovili katere mikroreliefne spremenljivke vplivajo na pojavljanje jam, smo uporabili podatke o 5923 jamah in enako število naključnih točk. Na celotnem preučevanem območju je registriranih 9010 jam (Kataster jam 2024), zaradi nenatančne lege pa smo jih 3087 izločili. Od jam vključenih v analizo jih je bila večina opredeljenih kot jame v apnencu, sledijo jame v dolomitu, najmanj pa je bilo jam v ostalih kamninah. Število, delež in gostota vključenih jam ter vseh jam na območju so predstavljeni v preglednici 2.

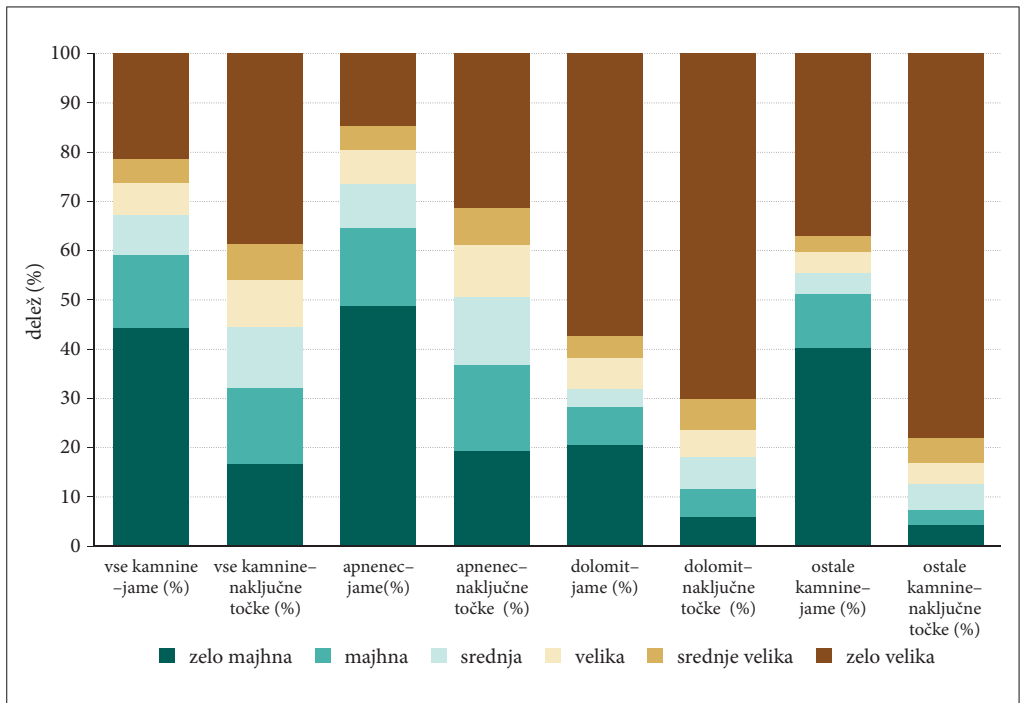
S faktorjem inflacije variance smo preverili ali med spremenljivkami prihaja do korelacije. Ker je bila vrednost spremenljivke VRM višja od 3 ($VRM_{VIF} = 3,13$), smo spremenljivko iz modelov odstranili ostale pa ohranili ($R_{izdanki_kamin}{}_{VIF} = 1,08$, $kamnitost_{VIF} = 1,59$, $R_{vrtace}{}_{VIF} = 1,03$, $TPI_{VIF} = 2,41$).

Preglednica 2: Število, delež in gostota jam glede na litološke enote za jame vključene v analizo (lega jam potrjena na podlagi GPS, GPS-RTK, LiDAR-ja ali teodolitske metode) in vse jame na preučevanem območju.

| | površina območja | število jam | delež jam | gostota jam |
|---------------------------------|------------------------|-------------|-----------|-------------------------|
| vse jame na preučevanem območju | | | | |
| vse jame | 5702,3 km ² | 9010 | 100 % | 1,6 jam/km ² |
| jame v apnencu | 3186,6 km ² | 7414 | 82,3 % | 2,3 jam/km ² |
| jame v dolomitu | 1255,9 km ² | 1233 | 13,7 % | 1,0 jam/km ² |
| jame v ostalih kamninah | 1259,8 km ² | 363 | 4,0 % | 0,3 jam/km ² |
| jame vključene v analizo | | | | |
| vse jame | 5702,3 km ² | 5923 | 100 % | 1,0 jam/km ² |
| jame v apnencu | 3186,6 km ² | 4850 | 81,9 % | 1,5 jam/km ² |
| jame v dolomitu | 1255,9 km ² | 835 | 14,1 % | 0,7 jam/km ² |
| jame v ostalih kamninah | 1259,8 km ² | 238 | 4,0 % | 0,2 jam/km ² |

4.2 Jame v odnosu do izdankov kamnin

Rezultati analize kažejo, da se deleži jam in naključnih točk v odnosu do izdankov kamnin pomembno razlikujejo. Delež jam v razredu z zelo majhno razdaljo do izdankov kamnin je namreč izrazito večji

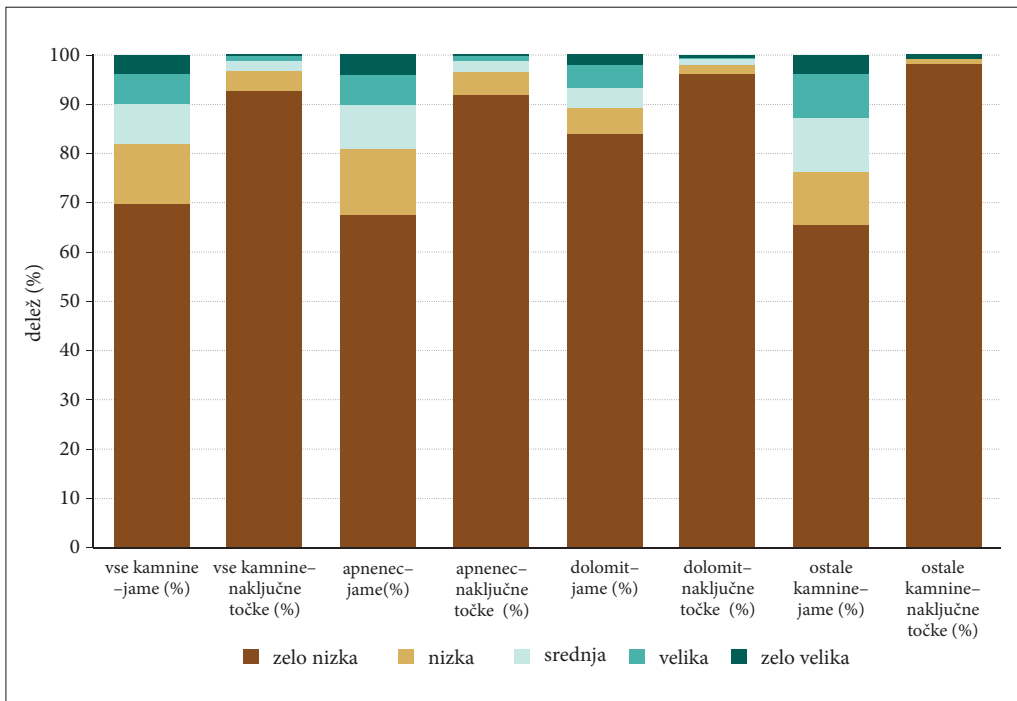


Slika 2: Deleži jam in naključnih točk po posameznih razredih razdalje do izdankov kamnin.

(44,5 %) kot v primeru naključnih točk (16,7 %, slika 2). Obratnosorazmeren je delež v kategoriji zelo velike oddaljenosti od izdankov kamnin. Še posebej izrazita je razlika med jamami (40,3 %) in naključnimi točkami (4,2 %) v ostalih kamninah. Največji delež jam v razredu z zelo majhno razdaljo do izdankov kamnin se sicer pojavlja v apnencu (48,9 %), v dolomitih pa je delež jam v istem razredu izrazito nižji (20,5 %, slika 2).

4.3 Jame v odnosu do kamnitosti površja

Rezultati analize kažejo, da se deleži jam in naključnih točk v odnosu do kamnitosti površja pomembno razlikujejo. Delež jam v razredu z zelo nizko kamnitostjo površja je namreč relativno manjši (69,9 %) kot v primeru naključnih točk (92,8 %; slika 3). Podobna razmerja se ohranjajo tudi pri ostalih razredih kamnitosti površja. Še posebej izrazita je razlika med jamami in naključnimi točkami v ostalih kamninah. Najvišji delež jam v razredu z zelo veliko kamnitostjo površja se sicer pojavlja v apnencu (4,1 %) in ostalih kamninah (3,8 %; slika 3).



Slika 3: Deleži jam in naključnih točk po posameznih razredih kamnitosti površja.

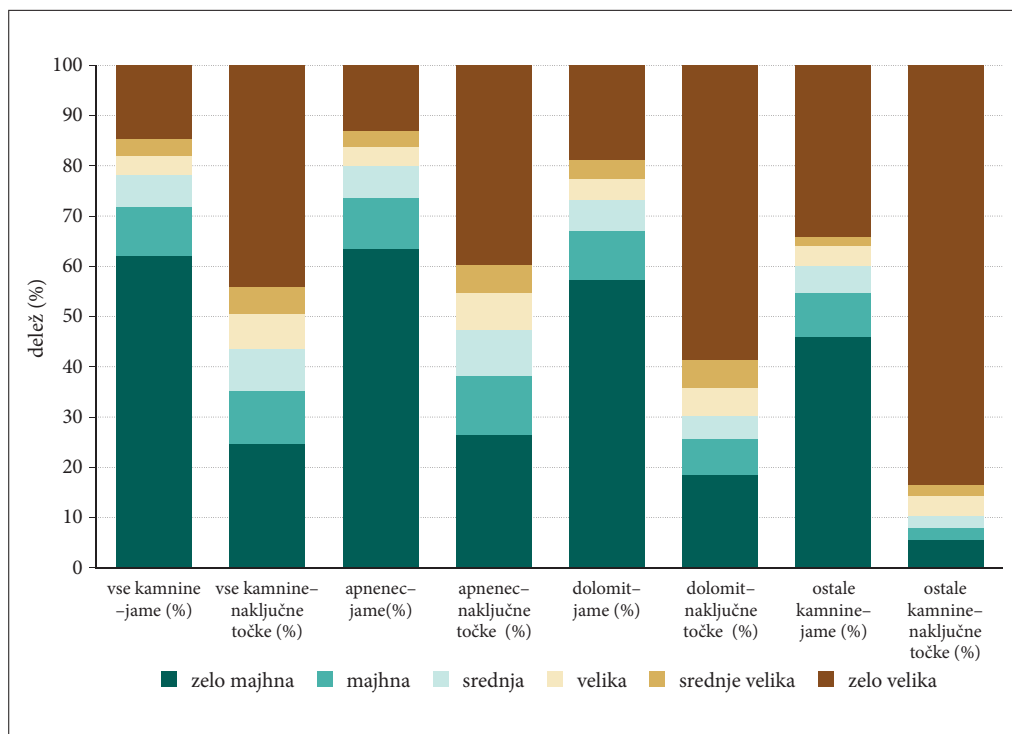
4.4 Jame v odnosu do vrtač

Deleži jam in naključnih točk v odnosu do vrtač se pomembno razlikujejo. Delež vseh jam (45,0 %) v vrtačah je večji kot delež naključnih točk (12,9 %; preglednica 3). Podobna razmerja se ohranjajo tudi pri jamah in naključnih točkah v ostalih litoloških enotah. Največji delež jam v vrtačah je v apnencu (46,3 %), najbolj izrazita pa je razlika (približno 35 %) med jamami in naključnimi točkami v ostalih kamninah (preglednica 3).

Pri spremenljivki razdalja do vrtač se deleži jam in naključnih točk pomembno razlikujejo. Delež jam v razredu z zelo majhno razdaljo do vrtač je izrazito večji (62,1 %) kot v primeru naključnih točk (24,6 %, slika 4). Podobna razmerja se ohranjajo tudi pri jamah in naključnih točkah v ostalih litoloških enotah. Največji delež jam v razredu z zelo majhno razdaljo do vrtač je v apnenecu (63,3 %), sledijo jame v dolomitu (57,5 %). Čeprav je delež jam v ostalih kamninah v razredu z zelo majhno razdaljo do vrtač najnižji (45,8 %), je razlika v tej litološki enoti v primerjavi z naključnimi točkami največja (40,3 %). Iz rezultatov je razvidno, da se več kot 50 % jam v vseh litoloških enotah pojavlja v neposredni bližini vrtač (razdalja do vrtač ≤ 20 m, slika 5).

Preglednica 3: Deleži jam in naključnih točk v vrtačah.

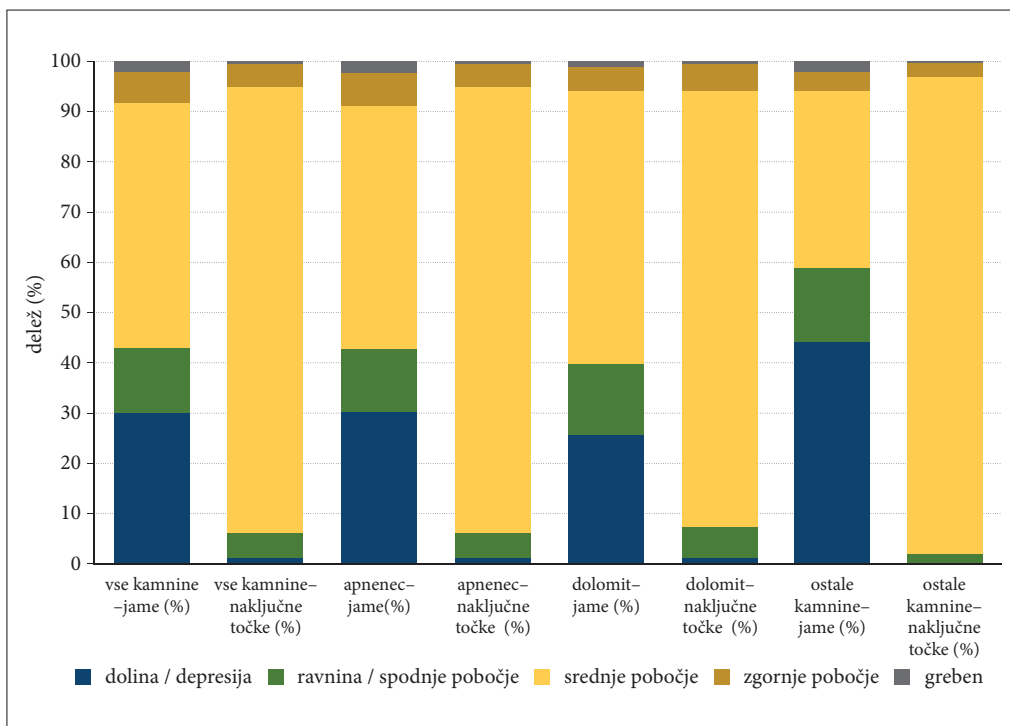
| | delež jam (%) | delež naključnih točk (%) |
|----------------|---------------|---------------------------|
| vse kamnine | 45,0 | 12,9 |
| apnenec | 46,3 | 13,9 |
| dolomit | 40,4 | 10,2 |
| ostale kamnine | 35,7 | 1,7 |



Slika 4: Deleži jam in naključnih točk po posameznih razredih razdalje do vrtač.

4.5 Jame v odnosu do topografskega pozicijskega indeksa (TPI)

Rezultati analize kažejo, da je glede na vrednosti TPI večina jam (48,9 %) v razredu srednje pobočje, vendar pa je v primerjavi z naključnimi točkami ta delež občutno nižji (88,8 %, slika 5). V vseh litoloških enotah je delež jam (30,0 %) v primerjavi z naključnimi točkami (0,0 %) v razredu dolina oz. depresija (npr. vrtače) občutno višji, najbolj izrazit pa je pri jamah v ostalih kamninah. Za razliko od ostalih litoloških enot, kjer je delež jam najvišji v razredu srednje pobočje, je delež jam v ostalih kamninah najvišji prav v razredu dolina oz. depresija (44,1 %, slika 5).



Slika 5: Deleži jam in naključnih točk po posameznih razredih topografskega pozicijskega indeksa (TPI).

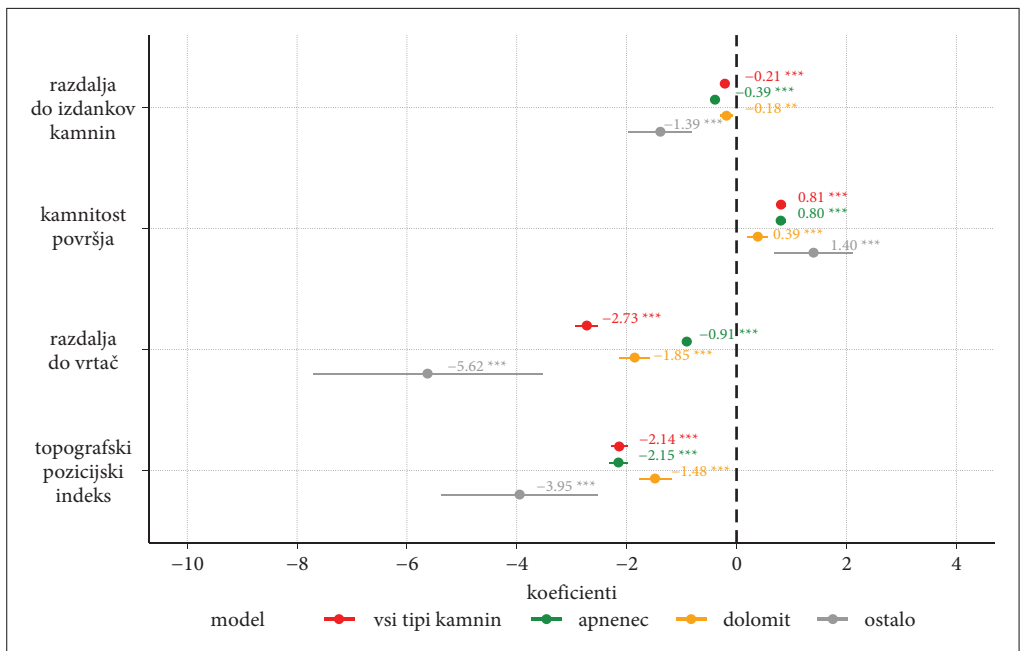
4.6 Modeliranje napovedovanja povezanosti mikroreliefnih oblik in pojavljanja jam

Vrednosti AIC in ΔAIC kažejo, da so bili modeli z vključenimi spremenljivkami boljši od ničelnih modelov (preglednica 4), kar potrjuje pomembnost izbranih spremenljivk pri napovedovanju povezanosti mikroreliefnih značilnosti s pojavljanjem jam. Vrednosti Spearmanovega koeficienta korelacije (preglednica 4) kažejo na zelo visoko prileganje modelov za vse jame ($\rho = 1,00$), jame v apnencih ($\rho = 1,00$) in jame v dolomitih ($\rho = 0,98$), medtem ko je prileganje modela za jame v ostalih kamninah zmerno ($\rho = 0,78$).

Vse vključene spremenljivke v modelih za napovedovanje povezanosti mikroreliefnih značilnosti s pojavljanjem jam so statistično značilne (slika 6). Rezultati kažejo na to, da se jame pogosteje pojavljajo v bližini izdankov kamnin in vrtač, na bolj kamnitih območjih in na območjih z nižjimi vrednostmi TPI kot naključne točke (slika 6). Med posameznimi modeli se kažejo razlike v učinkih spremenljivk

Preglednica 4: Za primerjavo uspešnosti modelov smo vključili tudi informacije o ničelnih modelih. V preglednici so predstavljene formule modelov logistične regresije, k – število spremenljivk, AIC – Akaike informacijski kriterij, ΔAIC – razlika AIC, ρ – Spearmanov koeficient korelacije.

| model | formula | k | AIC | ΔAIC | ρ |
|-------------------------|--|-----|-----------|--------------|--------|
| vse jame | | | | | |
| spremenljivke | jama ~ r_izdanki_k. + kamnitost + r_vrtača + TPI | 5 | 12.562,04 | 0,00 | 1,00 |
| ničelni model | jama ~ 1 | 2 | 16.424,04 | 3862 | 0,52 |
| jame v apnencu | | | | | |
| spremenljivke | jama ~ r_izdanki_k. + kamnitost + r_vrtača + TPI | 5 | 10.205,65 | 0,00 | 1,00 |
| ničelni model | jama ~ 1 | 2 | 13.449,06 | 3243,41 | 0,52 |
| jame v dolomitu | | | | | |
| spremenljivke | jama ~ r_izdanki_k. + kamnitost + r_vrtača + TPI | 5 | 1716,06 | 0,00 | 0,98 |
| ničelni model | jama ~ 1 | 2 | 2317,11 | 601,05 | 0,52 |
| jame v ostalih kamninah | | | | | |
| spremenljivke | jama ~ r_izdanki_k. + kamnitost + r_vrtača + TPI | 5 | 304,48 | 0,00 | 0,78 |
| ničelni model | jama ~ 1 | 2 | 661,88 | 357,40 | 0,52 |



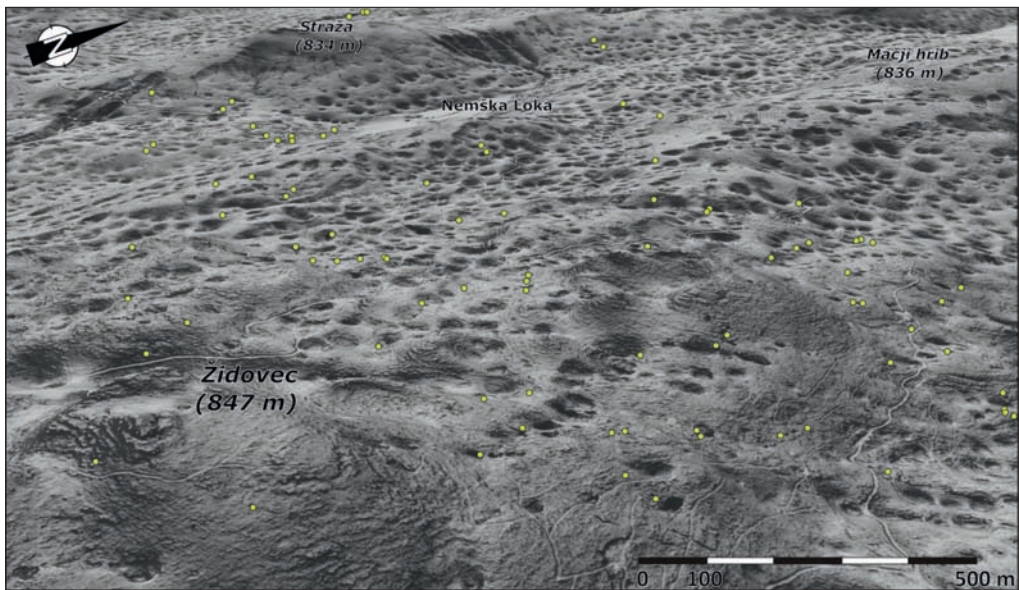
Slika 6: Ocenjeni koeficienti s 95-odstotnimi intervali zaupanja za modele logistične regresije za vse jame (rdeča), jame v apnencih (zelena), jame v dolomiti (oranžna) in jame v ostalih kamninah (siva). Koeficienti označujejo verjetnost pojavljanja jam v primerjavi z naključnimi točkami. Intervali, ki se ne prekrivajo z ničlo, kažejo na statistično pomembne učinke. Spremenljivki razdalja do izdankov kamnin in razdalja do vrtač temeljita na razdalji, zato negativne vrednosti kažejo na bližino.

na pojavljanje jam. Pri vseh jamah, jamah v dolomitih in jamah v ostalih kamninah ima največji učinek razdalja do vrtač, sledi TPI, nižji učinek ima kamnitost površja, najmanjši učinek pa ima razdalja do izdankov kamnin (slika 6). Na pojavljanje jam v apnencih najbolj vpliva TPI, sledita razdalja do vrtač in kamnitost površja, najmanjši učinek pa ima razdalja do izdankov kamnin (slika 6). Vrednosti koeficientov so najizrazitejše v primeru modela jam v ostalih kamninah, kar nakazuje, da se jame na ostalih kamninah pojavljajo še bližje vrtačam in izdankom kamnin ter na območjih z višjo kamnitostjo in nižjimi vrednostmi TPI (slika 6).

5 Diskusija

Rezultati kažejo, da se jame pojavljajo v bližini izdankov kamnin, na območjih z večjo kamnitostjo površja, v vrtačah oz. njihovi neposredni okolici in na območjih, kjer so vrednosti topografskega pozicijskega indeksa (TPI) nižje (slika 7). Na to kažejo tako rezultati primerjave deležev jam po razredih z naključnimi točkami, kot tudi rezultati modeliranja. S pojavljanjem jam sta najbolj povezani spremenljivki razdalja do vrtač in TPI, najmanj pa kamnitost površja in razdalja do izdankov kamnin.

Čeprav ima glede na rezultate modeliranja razdalja do izdankov kamnin najnižje učinke na pojavljanje jam, se v njihovi neposredni bližini (razdalja ≤ 20 m) v apnencih pojavlja približno 60 % jam, v ostalih kamninah pa okoli 50 % jam. Delež jam v dolomitu v njihovi neposredni okolici je nekoliko nižji (približno 30 %). Glede na razrede kamnitosti površja, se večina jam (v vseh razredih > 65 % jam) pojavlja na območjih z zelo nizko kamnitostjo, vendar pa je ta delež v primerjavi z naključnimi točkami nižji (v vseh litoloških enotah > 95 % naključnih točk), kar nakazuje, da so jame pogostejše na območjih z večjo kamnitostjo površja. Tako kot pri razdalji do izdankov kamnin, je tudi delež jam v dolomitu v razredu zelo nizke kamnitosti višji za približno 15–20 % kot pri vseh jamah, jamah v apnencih in ostalih



Slika 7: Primer pojavljanja jam na območju Židovca na Poljanski gori, kjer prevladujejo apnenci kredne in jurske starosti. S slike je razvidno, da se večina jam pojavlja v bližini vrtač in na razgibanem terenu, ki lahko nakazuje na kamnitost površja.

kamninah. Nižje vrednosti deležev jam v dolomitih v odnosu do izdankov kamnin so lahko posledica tega, da je gostota izdankov kamnin v dolomitih (290,3 izdankov kamnin/km²) izjemno nizka v primerjavi z apnenci (1115,2 izdankov kamnin/km²; Čonč s sodelavci 2024). Gostota je sicer še nižja v enoti ostalih kamnin (17,1 izdankov kamnin/km²; Čonč s sodelavci 2024), vendar hkrati v tej enoti prevladujejo predvsem ponorne in izvirne jame, ki se najpogosteje pojavljajo v zatrepih na območju kontaktnega krasa (slika 1). Za zatrepe je značilno, da je nad jamo oblikovana strma stena (Tičar 2015). Pojavljanje izdankov kamnin na površju nakazuje na pretrtost kamnine, ki se odraža kot nezveznost v kamnini (npr. prisotnost por, lezik, razpok, itd.) zaradi razmaknitve skladov. Po nezveznostih se voda pretaka v podzemlje in jih korozijsko širi, kar je predpogoj za nastanek jam (Gams 2004; Ford in Williams 2007; Čar 2018; Stepišnik 2020).

Na pojavljanje vseh jam, jam v dolomitih in jam v ostalih kamninah ima največji učinek razdalja do vrtač, medtem ko na jame v apnencih najbolj vpliva TPI. Zanimivo je predvsem, da ima na pojavljanje jam v ostalih kamninah največji učinek razdalja do vrtač, kljub temu, da je gostota vrtač v ostalih kamninah skoraj zanemarljiva (Mihevc in Mihevc 2021; Čonč s sodelavci 2022). Na ostalih kamninah modeli za avtomatsko zaznavanje kraških kotanj zaznajo predvsem sufozijske vrtače oz. greze ter podobne depresije, ki so na območjih kontaktnega in/ali pokritega krasa oblikovane predvsem v aluvialnih nanosih. V takšnih reliefnih oblikah so pogosto oblikovani požiralniki, ponori in ponikve, ki glede na Kataster jam lahko predstavljajo tudi vhode v jame. Manjša gostota in pojavnost vrtač na ostalih kamninah in velik učinek spremenljivke na jame v ostalih kamninah dodatno nakazuje, da bližina vrtač pomembno vpliva na pojavljanje. Rezultati študije, ki jo je v Kentucky, ZDA, izvedel Blitch s sodelavci (2023), prav tako kažejo na to, da ima bližina vrtač najpomembnejši vpliv pri napovedovanju pojavljanja jam. Razlika v učinku med TPI in razdaljo do vrtač je verjetno povezana s tem, da je v apnencih številčnost in gostota vrtač največja (Mihevc in Mihevc 2021; Čonč s sodelavci 2022), posledično je med vsemi štirimi skupinami obravnavanih jam v apnencih največji tudi delež jam v vrtačah oz. v njihovi neposredni okolici. Na splošno velja, da če je napovedovalna spremenljivka pogosta in zelo razširjena, bo ta za model manj uporabna (Blitch s sodelavci 2023). Ne glede na to, se na vseh litoloških enotah več kot 50 % jam pojavlja v neposredni bližini vrtač (razdalja do vrtač ≤ 20 m), kar lahko opredelimo s tem, da je prostorska razporeditev vrtač na nekaterih območjih Dinarskega krasa močno povezana z geološko strukturo, plastovitostjo kamnin in prelomi (Mihevc in Mihevc 2021). Kot omenjeno, so to tudi pogoji, ki vplivajo na razvoj jam (Gams 2004; Ford in Williams 2007; Čar 2018).

Glede na vrednosti TPI, je večina jam v razredu srednje pobočje. Glede na to, da je visok delež jam (približno 45 % vseh jam) v vrtačah, se morda najpogosteje pojavljajo prav na pobočjih vrtač, kjer se pogosto pojavljajo tudi izdanki kamnin (Čonč s sodelavci 2024). V primerjavi z naključnimi točkami se jame v vseh litoloških enotah pogosteje pojavljajo tudi v reliefnih oblikah, ki so izoblikovane kot depresije (npr. vrtače).

6 Sklep

Izvedena raziskava prikazuje, da je ekološki pristop modeliranja, ki temelji na primerjavi preučevanih lokacij in naključnih točk, ki odražajo splošne značilnosti preučevanega območja (*»use-available approach«*; Johnson 1980), lahko koristno orodje pri preučevanju geomorfoloških značilnosti, natančneje pri napovedovanju vpliva mikroreliefnih značilnosti na pojavljanje jam. Rezultati kažejo, da se jame pojavljajo v bližini izdankov kamnin, na območjih z večjo kamnitostjo površja, v vrtačah oz. njihovi neposredni okolici in na območjih, kjer so vrednosti topografskega pozicijskega indeksa (TPI) nižje. Uporaba metod za ekološko modeliranje (npr. *MaxEnt*) se je že izkazala kot uspešna pri napovedovanju pojavljanja jam (Blitch s sodelavci 2023). Poleg metod za modeliranje pa ima velik potencial tudi uporaba visoko resolucijskih prostorskih podatkov (LiDAR DMV), saj so koristen in zanesljivejši vir informacij za učinkovito odkrivanje in preučevanje prostorskih vzorcev, morfoloških značilnosti

površja in posameznih reliefnih oblik na mikronivoju (Triglav Čekada 2011; Čonč s sodelavci 2022; 2024). Z rezultati pa si lahko pomagamo tudi pri preučevanju in razumevanju povezav med površjem in podzemljem (Breg Valjavec s sodelavci 2022). V nadaljnjih študijah o napovedovanju vpliva geomorfoloških in geoloških značilnosti na pojavljanje jam bi bilo morda smiselno vključiti tudi podatke o izvirih, smereh podzemnega toka, prelomih in geoloških strukturnih elementih (Blitch s sodelavci 2023), vprašljiva pa je prostorska natančnost teh podatkov. Poleg tega pa poznavanje vpliva mikroreliefnih značilnosti na pojavljanje jam lahko pripomore tudi k lažjemu ter stroškovno učinkovitejšemu odkrivanju jam ter k njihovem zavarovanju in ohranjanju.

ZAHVALA: Raziskavo je financirala Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije v okviru raziskovalnega programa Geografija Slovenije (P6-0101), financiranje mlade raziskovalke (MR-54767) ter temeljnih raziskovalnih projektov Koncept soodvisnosti v krasu: povezanost vrtač in jam z vidika antropogenih vplivov (J6-2592) in Podpora rekonstrukciji holocenskega podnebja z visokoločljivimi kriosferskimi podatki iz kraških ledenih jam v Sloveniji (J6-50214).

7 Viri in literatura

- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., Walker, S. 2015: Fitting linear mixed-effects models using lme4. arXiv:1406.5823. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1406.5823>
- Bauer, C. 2015: Analysis of dolines using multiple methods applied to airborne laser scanning data. *Geomorphology* 250. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.08.015>
- Blitch, W., Sovie, A. R., Tobin, B. W., 2023. Predictive modeling of cave entrance locations: relationships between surface and subsurface morphology. *International Journal of Speleology* 52-2. DOI: <https://doi.org/10.5038/1827-806X.52.2.2455>
- Boyce, M. S., Vernier, P. R., Nielsen, S. E., Schmiegelow, F. K. A. 2002: Evaluating resource selection functions. *Ecological Modelling* 157-2,3. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00200-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00200-4)
- Breg Valjavec, M., Ciglič, R., Tičar, J., Šebela, S. 2022: Določanje geomorfoloških in hidrogeoloških povezav med vrtačami in jamo Polina peč s 3D laserskim skeniranjem. *Preteklost in prihodnost, GIS v Sloveniji* 16. Ljubljana. DOI: https://doi.org/10.3986/9789610506683_03
- Chiba, T., Kaneta, S., Suzuki, Y. 2008: Red relief image map: New visualization method for three dimensional data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 37-2.
- Čar, J. 2018: Geostructural mapping of karstified limestones. *Geologija* 61-2. DOI: <https://doi.org/10.5474/geologija.2018.010>
- Čekada, M., Gostinčar, P. 2016: Uporaba lidarja v jamarstvu. *Digitalni podatki, GIS v Sloveniji* 13. Ljubljana. DOI: <https://doi.org/10.3986/9789612549305>
- Čonč, Š., Oliveira, T., Belotti, E., Bufka, L., Černe, R., Heurich, M., Breg Valjavec, M., Krofel, M. 2024: Revealing functional responses in habitat selection of rocky features and rugged terrain by Eurasian lynx (*Lynx lynx*) using LiDAR data. *Landscape Ecology* 39. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10980-024-01923-y>
- Čonč, Š., Oliveira, T., Portas, R., Černe, R., Breg Valjavec, M., Krofel, M. 2022: Dolines and cats: remote detection of karst depressions and their application to study wild felid ecology. *Remote Sensing* 14. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14030656>
- Day, M., Chenoweth, S. 2013: Surface roughness of karst landscapes. *Treatise on Geomorphology* 6. London. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00108-1>
- Fitzsimons, J. A., Michael, D. R. 2017: Rocky outcrops: A hard road in the conservation of critical habitats. *Biological Conservation* 211-B. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.11.019>
- Ford, D., Williams, P.D. 2007: *Karst hydrogeology and geomorphology*. Chichester. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118684986>

- Gams, I. 2004: Kras v Sloveniji v prostoru in času. Ljubljana.
- Gelman, A. 2008: Scaling regression inputs by dividing by two standard deviations. *Statistics in Medicine* 27-15. DOI: <https://doi.org/10.1002/sim.3107>
- Gostinčar, P., Stepišnik, U. 2023: Extent and spatial distribution of karst in Slovenia. *Acta geographica Slovenica* 63-1. DOI: <https://doi.org/10.3986/AGS.11679>
- Hrvatina, M. 2016: Morfometrične značilnosti površja na različnih kamninah v Sloveniji. Doktorska disertacija, Fakulteta za humanistične študije Univerze na Primorskem, Koper.
- Hrvatina, M., Perko, D. 2012: Uporabnost topografskega pozicijskega indeksa za morfološko analizo površja. *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2011–2012, GIS v Sloveniji 11*. Ljubljana. DOI: <https://doi.org/10.3986/9789612545956>
- Jamarska zveza Slovenije, 2014: Navodila za izpolnjevanje zapisnikov Katastra jam. Ljubljana.
- Johnson, D. H. 1980: The comparison of usage and availability measurements for evaluating resource preference. *Ecology* 61-1. DOI: <https://doi.org/10.2307/1937156>
- Kataster jam 2024. Jamarska zveza Slovenije, Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU. Ljubljana, Postojna.
- Mihevc, A., Mihevc, R. 2021: Morphological characteristics and distribution of dolines in Slovenia, a study of a lidar-based doline map of Slovenia. *Acta Carsologica* 50-1. DOI: <https://doi.org/10.3986/ac.v50i1.9462>
- Mihevc, A., Prelovšek, M., Zupan Hajna, N. 2010: Introduction to the Dinaric Karst. Postojna. DOI: <https://doi.org/10.3986/9789612541989>
- Palmer, A. N., 2007: Cave geology. Ohio.
- Sappington, J. M., Longshore, K. M., Thompson, D. B. 2007: Quantifying landscape ruggedness for animal habitat analysis: A case study using bighorn sheep in the Mojave Desert. *Journal of Wildlife Management* 71-5. DOI: <https://doi.org/10.2193/2005-723>
- Stefanovski, S., Repe, B. 2021: Proučevanje vzpetin kopastega krasa s pomočjo digitalnega modela višin. *Dela* 52. DOI: <https://doi.org/10.4312/dela.52.141-160>
- Stefanovski, S., Kokalj, Ž., Stepišnik, U. 2024: Sky-View Factor Enhanced Doline Delineation: A Comparative Methodological Review Based on Case Studies in Slovenia. *Geomorphology* (v recenziji).
- Stepišnik, U. 2020: Fizična geografija krasa. Ljubljana.
- Telbisz, T. 2021: Lidar-based morphometry of conical hills in temperate karst areas in Slovenia. *Remote Sensing* 13. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13142668>
- Tičar, J. 2015: Geomorfološke značilnosti izbranih zatrepnih dolin v Sloveniji. *Geografski vestnik* 87-1. DOI: <https://doi.org/10.3986/GV87102>
- Tičar, J., Čekada, M. 2018: Natančnost določanja lege naravnih vrednot v Sloveniji na primeru kraških jam. *GIS v Sloveniji* 13-14. Ljubljana. DOI: <https://doi.org/10.3986/9789610501138>
- Triglav Čekada, M. 2011: Možnost uporabe zračnega laserskega skeniranja (LIDAR) za geomorfološke študije. *Geografski vestnik* 83-2.
- Triglav Čekada, M., Bric V. 2015: Končan je projekt laserskega skeniranja Slovenije. *Geodetski vestnik* 59-3.
- Twidale, C. R. 2000: Granite outcrops: Their utilisation and conservation. *Journal of the Royal Society of Western Australia* 83-3.
- Valavi, R., Guillera-Aroita, G., Lahoz-Monfort, J. J., Elith, J., 2021: Predictive performance of presence-only species distribution models: a benchmark study with reproducible code. *Ecological Monographs* 92-1. DOI: <https://doi.org/10.1002/ecm.1486>
- Veress, M. 2020: Karst types and their karstification. *Journal of Earth Science* 31. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1306-x>
- Weiss, A. D. 2001: Topographic position and landforms analysis. *ESRI Users Conference*. San Diego.
- Zakon o varstvu podzemnih jam. Uradni list RS št. 2/2004. Ljubljana.

- Zakšek K., Oštir K., Kokalj Ž. 2011: Sky-View Factor as a relief visualization technique. Remote Sensing 3-2. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs3020398>
- Zorn, M., Ferk, M., Lipar, M., Komac, B., Tičar, J., Hrvatini, M. (2020): Landforms of Slovenia. The Geography of Slovenia, World Regional Geography Book Series. Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-14066-3_3
- Zupan Hajna, N., 2004: Karst in Slovenia. Slovenia: A Geographical Overview. Ljubljana.
- Zuur, A. F., Ieno, E. N., Elphick C. S. 2010: A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. Methods in Ecology and Evolution 1-1. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2009.00001.x>