

# PROSTORSKA STATISTIKA GLOBIN VRTAČ NA MATARSKEM PODOLJU Z METODO GETIS-ORD

**dr. Timotej Verbovšek**

Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo  
timotej.verbovsek@geo.ntf.uni-lj.si, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1908-5759>

DOI: [https://doi.org/10.3986/9789610504696\\_01](https://doi.org/10.3986/9789610504696_01)

UDK: 551.435.82:004.4'23(497.4Matarsko podolje)

## IZVLEČEK

### **Prostorska statistika globin vrtač na Matarskem podolju z metodo Getis-Ord**

V prispevku je predstavljena geostatistična metoda Getis-Ord, ki išče t.i. vroče in mrzle točke; prostorske enote s podobnimi izstopajočimi statistično značilnimi vrednostmi (vroče točke predstavljajo skupine najvišjih, mrzle točke pa najnižjih vrednosti). Metoda je bila uporabljena za analizo globin vrtač na zakraselem območju Matarskega podolja, ki ga sestavljajo predvsem kredni apnenci. Sam zemljevid globin vrtač ne omogoča razpoznavanja skupin globljih vrtač, medtem ko z metodo Getis-Ord jasno prepoznamo območja, kjer so globine večje in se združujejo v prostorske skupine. Ena od teh območij, ki ga je zaznala metoda in ni vezano na smer raztezanja geoloških plasti in tektonskih struktur, temveč poteka skoraj prečno na njih, je na območju, kjer se nahaja večje število jam. Metoda se je izkazala za uporabno pri razumevanju in analizi kraških pojavov.

## KLJUČNE BESEDE

kras, vrtače, jame, Getis-Ord, Matarsko podolje

## ABSTRACT

### **Spatial statistics of doline depths in Matarsko podolje (SW Slovenia) with Getis-Ord method**

The paper presents the Getis-Ord geostatistical method, which maps the hot and cold spots; these are spatial clusters of features with significantly high values (hot spots) or low values (cold spots). The method was used for the analysis of doline depths in the karstified area of Matarsko Podolje (SW Slovenia), composed mainly of Cretaceous limestones. The doline depth map itself does not provide the recognition of deeper doline groups, while the Getis-Ord method clearly identifies areas where depths are greater and these dolines form spatial clusters. One of these hot spot areas, detected by the method and not related to the direction of extension of the geological layers and tectonic structures, but being almost perpendicular to them, lies in the same area where many caves are located. The method is therefore useful in understanding and analysing karst phenomena.

## KEY WORDS

karst, dolines, caves, Getis-Ord, Matarsko podolje

## 1 Uvod

Vrtače so ene najznačilnejših kraških oblik in so že dolgo predmet preučevanja (Ford in Williams 2007). Številni raziskovalci so se že pred več kot 40 leti (Williams 1972; Jennings 1975; White in White 1979) ukvarjali z kvantitativnim preučevanjem njihovih morfoloških lastnosti ali modeliranjem njihovih oblik in geneze (Čar 2001; 2018; Šušteršič 2006a), med katere sodijo osnovne geometrijske lastnosti (Basso s sodelavci 2013; Kobal s sodelavci 2014; Bauer 2015; Enyedi s sodelavci 2018; Šegina s sodelavci 2018), na primer njihov premer, globina, površina, prostornina, pa tudi izpeljani parametri, kot so indeks krožnosti in podobno. V prispevku je predstavljeno nadaljevanje raziskav vrtač na Matarskem podolju, ki sta jih izvedla Verbovšek in Gabor (2019), s poudarkom na uporabi metode *Getis-Ord*, ki je manj znana geostatistična analiza in se je izkazala za uporabno pri določevanju lokacij jam na omejenem območju. Analizo vročih in mrzlih točk v Sloveniji so izvedli Hrvatini in Perko (2016) ter Perko, Hrvatini in Ciglič (2017), toda za drugačen primer, za analizo pokrajnin. Z uporabo metode *Getis-Ord* so Lipar, Kostanjšek in Žura (2010) ugotavljali prostorske statistike za določevanje zgostitev prometnih nesreč. Še najbolj podobna študija je bila opravljena za ugotavljanje prostorske porazdelitve jam v apnencih v Zahodni Virginiji v ZDA (Stocks in Shears 2015), za analizo vrtač na kraškem območju pa metoda še ni bila uporabljena.

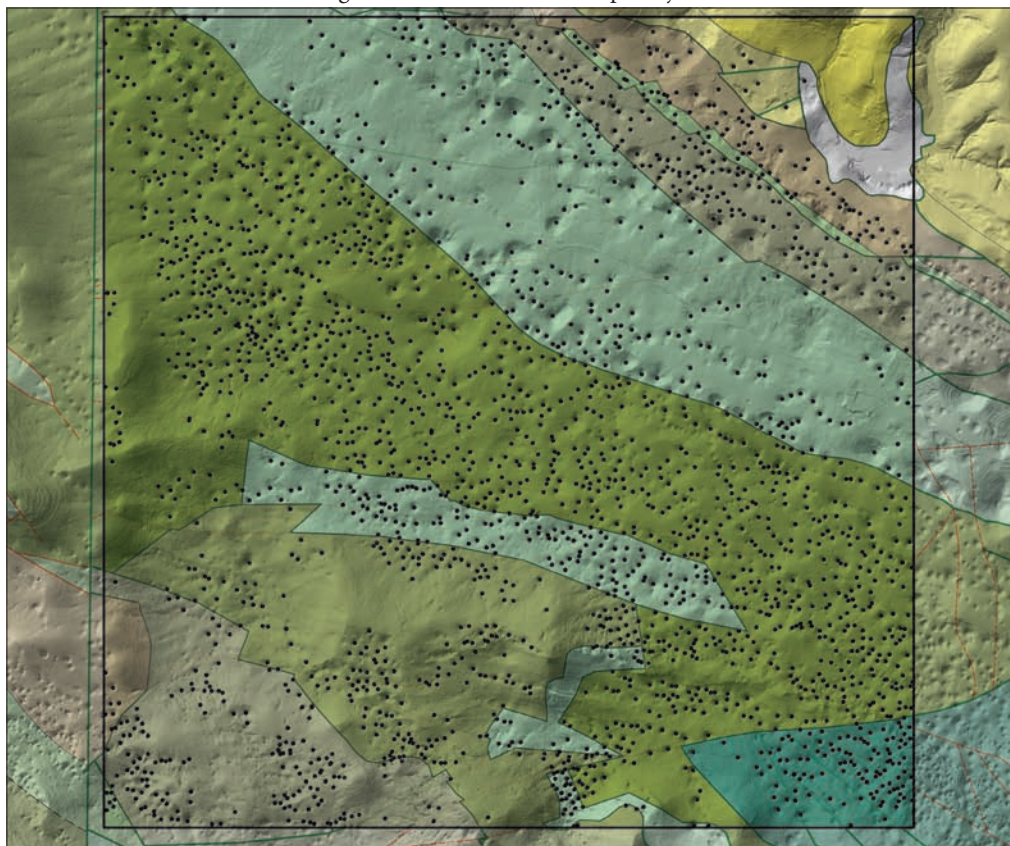
Matarsko podolje je kraški ravniki, ki se razprostira v smeri severozahod–jugovzhod med Brkini na severovzhodu in Slavnikom na jugozahodu. Proti jugovzhodu se dviguje od nadmorske višine približno 500 m do 680 m, dolgo je okoli 20 km in široko med 2 in 5 km (Mihevc 1994). Gre za območje kontaktnega krasa, ker se površinske vode iz Brkinov, ki jih sestavlja eocenski, slabo prepusten fliš, stekajo proti jugozahodu in ponikajo na stiku z apnenci Matarskega podolja, ki jih predstavljajo različne kamnine kredne starosti, predvsem apnenci, podrejeno tudi dolomiti in kredne breče (Šikić, Pleničar in Šparica 1967; Jež s sodelavci 2011; slika 1). Vode nato podzemno tečejo proti izviru Rižane in v Kvarnerski zaliv. Tektonsko pripada ozemlje Zunanjim Dinaridom (Placer 2008). Pojavlja se večje število prelomov dinarske smeri (severozahod–jugovzhod), nekateri prelomi pa imajo vlogo tako imenovanih zapornih prelomov, ki kanalizirajo podzemne vode (Šušteršič 2006b). Potokov, ki ponikajo iz Brkinov, je sedemnajst ter na stiku fliša in apnenca tvorijo slepe doline (Mihevc 1994; Stepišnik s sodelavci 2007). Nadaljevanje podzemnega toka je vezano na številne jame, ki so danes suhe. Območje je zelo zakraselo, pojavlja se veliko število vrtač. Človeškega vpliva na površje skorajda ni, razen nekaj vasi vzdolž ceste Kozina–Starod, ki poteka ob vznožju Brkinov. Poleg nekaj lokalnih poti v pokrajini ni večjih antropogenih posegov, zato je območje zelo primerno za analize površja. Na obravnavanem območju je 165 jam, njihova gostota pa je zelo velika (okoli 3–5 jam/km<sup>2</sup>) in je nad slovenskim povprečjem (0–1 jam/km<sup>2</sup>; Tičar, Perko in Volk Bahun 2018). Prevladujejo nekaj deset metrov globoka brezna, ki so povezana v horizontalne jamske sisteme. Med (jamarjem) bolj znanimi je jama Medvedjak, geneza jame Pečina v Zjatih pa je opisana v prispevku Verbovska (2003). Preučevano območje je veliko 25 km<sup>2</sup> (5 × 5 km). Analiza površja je bila opravljena na rastrskem digitalnem modelu površja DMR1, ki je bil izdelan na podlagi lidarskega snemanja Slovenije (Triglav Čekada in Bric 2015; Medmrežje 1). Uporabnost tega natančnega rastrskega sloja za jamarstvo sta prepoznala Čekada in Gostinčarjeva (2016), ki sta predstavila tako uporabnost rastrskih podatkov kot tudi oblakov točk za jamarske raziskave.

## 2 Metode dela

Lokacije vrtač (slika 1) so bile določene na podlagi metode najvišje sklenjene izohipse (metoda *OCC*; *Outermost Closed Contour*; Bauer 2015). Risanje obodov je bilo narejeno ročno, da smo se izognili

*Slika 1: Geološka zgradba obravnavanega območja in lokacije vrtač; manjša slika prikazuje lego območja. ►*

Prostorska statistika globlin vrtač na Matarskem podolju z metodo Getis-Ord



**Legenda**

- lokacija vrtače
- obravnavano območje

**Geološka karta**

- kvartarni nanosi (aluvij)
- eocenski fliš
- [Pg\_apn] turonijski in senonijski apnenci s foraminiferami
- [Koz] zgornjekredni kozinski apnenci
- [Apn\_pla] turonijski plastoviti apnenci
- [Dol\_apn] cenomanijski in turonijski apnenci in dolomiti
- [Breča] albijski in cenomanijski dolomiti ter apnenčaste breče
- [Apn\_rud] cenomanijski in turonijski apnenci, podrejeno dolomiti
- [Apn\_dol] cenomanijski in turonijski apnenci in dolomiti
- [Apn\_bre] debeložrnati in brečasti apnenci, apnenčaste breče
- [Apn\_ker] apnenci s fosili keramosferina



Avtor vsebine in zemljevida: Timotej Verbošek  
 Vir: Javne informacije Slovenije,  
 Geodetska uprava Republike  
 Slovenije 2014 in 2020.  
 © 2020, Univerza v Ljubljani,  
 Naravoslovnotehniška fakulteta



napakam, ki jih naredijo metode avtomatičnega zaznavanja vrtač, ki temeljijo na zapolnjevanju površja z metodo prelivanja vode in iskanja višine zaključenih kotanj (Breg Valjavec 2010; Doctor in Young 2013; De Carvalho Júnior s sodelavci 2014; Bauer 2015). Te metode lahko podajo tudi večje vrednosti površin kot ročno določanje (Telbisz, Dragušica in Nagy 2009). Naredili smo tudi točkovni sloj najnižje točke v vrtači; tej smo pripisali nadmorsko višino z ukazom *Extract Values to Point*, s pomočjo programskega orodja *ArcMap*. Ročni izris izohipse je bil opravljen na izohipsah z višinskim intervalom 1 m, ki je bil izdelan iz rastrskega sloja nadmorskih višin. Ker so izohipse, izdelane iz rastrskega sloja, precej nepravilne oziroma nazobčane, smo jih zgladili z orodjem *Smooth Polygons* in toleranco 15 m. Nato smo preverili topologijo z uporabo dveh topoloških pravil – vsak poligon vrtače je moral vsebovati natanko eno točko z najnižjo nadmorsko višino ter poligoni vrtač se ne smejo prekrivati. Poligone vrtač smo pretvorili v linijske objekte in te spremenili v 3R objekte z orodjem *Interpolate Shape*. Te smo nato spremenili nazaj v 3R poligone in izračunali povprečno vrednost nadmorske višine oboda vrtač (orodje *Calculate Geometry*). Od teh povprečnih vrednosti nadmorskih višin poligonov smo odšteli globine najnižjih točk in tako izračunali globine vrtač, ki smo jih obravnavali z metodo *Getis-Ord*. Ostalih kvantitativnih parametrov (površina, prostornina, indeks krožnosti in podobno) v tem prispevku ne obravnavamo, ker je bila ta tematika že predstavljena v članku Verbovska in Gaborjeve (2019).

Metoda *Getis-Ord* (Getis in Ord 1992; Ord in Getis 1995) je prostorska statistična metoda, namenjena identifikaciji skupin, katerih vrednosti se grupirajo. Ničelna hipoteza je, da ni prostorskega grupiranja (*clustering*) vrednosti (na primer globin vrtač). V prispevku so bile testirane tri stopnje zaupanja ( $\alpha$ ), 10 %, 5 % in 1 %. Rezultat metode so območja vročih točk, ki predstavljajo skupine s podobnimi visokimi vrednostmi (globin vrtač), kar je razvidno iz visokih vrednosti indeksa  $G_i^*$ . Analogno so tako imenovane mrzle točke tiste skupine, ki imajo podobno nizke vrednosti globin vrtač oziroma nizke vrednosti  $G_i^*$ . Metoda z imenom *Hot Spot Analysis (Getis-Ord  $G_i^*$ )* je na voljo v programskem orodju *ArcGIS*, v naboru orodij prostorske statistike (*Spatial Statistics*). To metodo smo uporabili, ker omogoča izračune iz že obstoječih slojev ter rezultate poda kot zemljevid vročih in mrzlih točk. Indeks  $G_i^*$  je določen z enačbo 1 (Mitchell 2009):

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_i w_{ij}(d)x_j}{\sum_i x_j} \quad (1)$$

kjer so vrednosti:

$G_i^*(d)$  = vrednost indeksa  $G^*$  za  $i$ -to vrtačo v odvisnosti od razdalje ( $d$ );

$d$  = razdalja med dvema izračunanima vrtačama;

$w_{ij}$  = utež glede na razdaljo med vrtačama;

$x_j$  = vsota vrednosti (globin).

Statistično testiranje  $G_i^*$  poteka s standardno Z-vrednostjo (enačba 2):

$$Z(G_i^*) = \frac{G_i^* - E(G_i^*)}{\sqrt{Var(G_i^*)}} \quad (2)$$

kjer so vrednosti:

$E(G_i^*)$  = pričakovana vrednost indeksa  $G^*$ ;

$Var(G_i^*)$  = varianca indeksa  $G^*$ .

Pričakovano vrednost  $E(G_i^*)$  pa določimo iz enačbe 3:

$$E(G_i^*) = \frac{\sum_i w_{ij}(d)}{n-1} \quad (3)$$

kjer je  $n$  = število analiziranih vrtač.



Visoke pozitivne vrednosti  $Z$  kažejo vroče točke, nizke vrednosti mrzle točke in vrednosti  $Z$  okoli ničle neznačilne točke brez posebnosti oziroma prostorskih povezav.  $Z$ -vrednosti prikažemo tudi kot rezultat na zemljevidu, saj lahko preko njih testiramo statistično značilnost (na primer na stopnji zaupanja 95 % je  $Z$  manjši od  $-1,96$  ali večji od  $+1,96$ ), pri čemer uporabimo privzeto rdeče barve za vroče točke in modre barve za mrzle točke.

### 3 Rezultati in diskusija

Na območju se nahaja 2357 vrtač, torej 94 vrtač/km<sup>2</sup>, kar območje uvršča v razred zelo visoke gostote vrtač (Faivre in Pahernik 2007). Lokacije vrtač z globlinami so prikazane na sliki 2. Povprečna vrednost globlin je 2,98 m, globline pa se gibljejo med 0,03 m in 35 m. Na sliki iz porazdelitve globlin na prvi pogled ni razvidno, da bi bila med vrtačami glede na ta parameter kakšna povezava. Večje vrtače so pričakovano globlje, vmes je nekaj brezen, ki so relativno globoka glede na površino njihove kotanje/obseg.

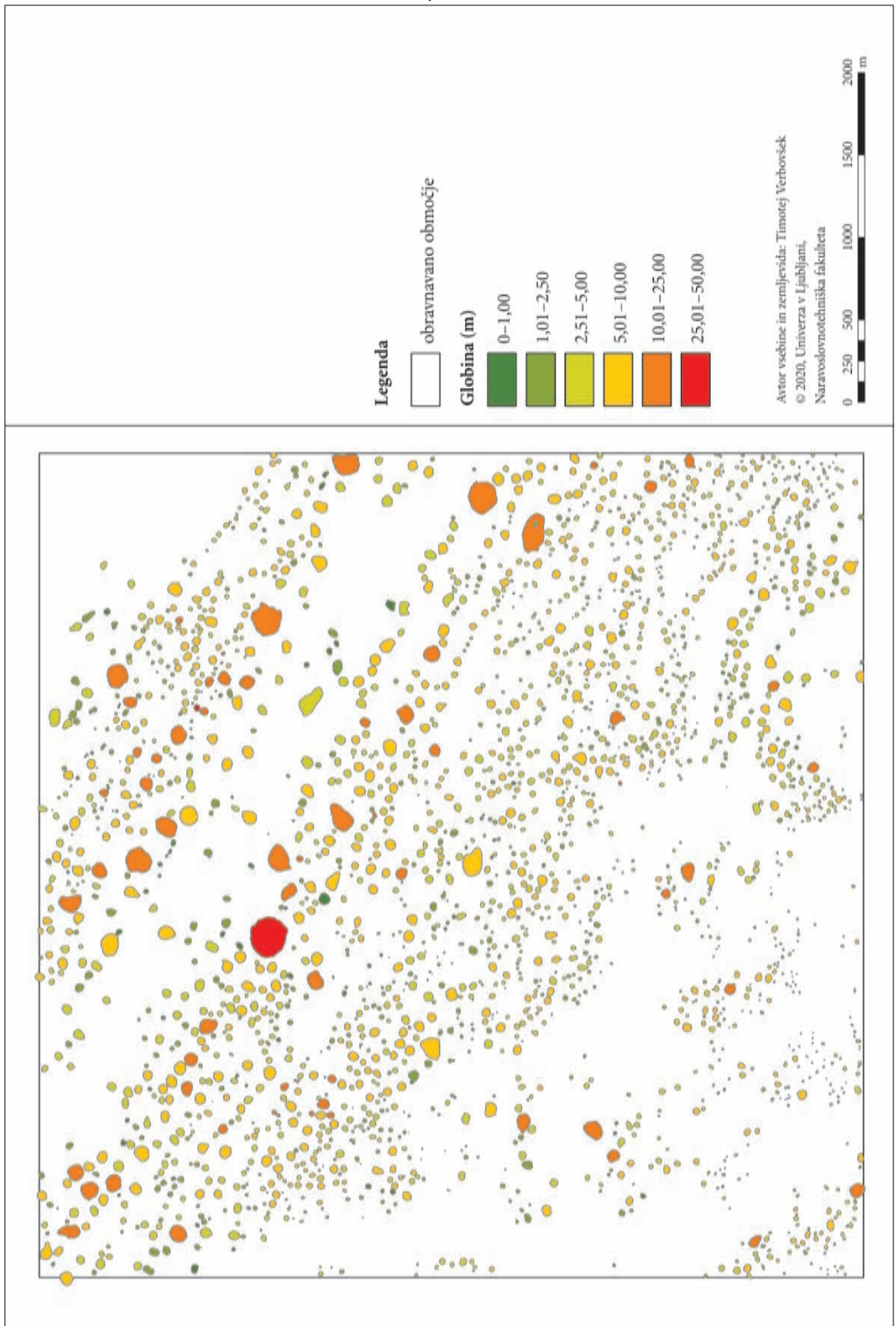
Večje in tudi globlje vrtače se pojavljajo v dveh pasovih na severovzhodnem delu območja, v smeri severozahod–jugovzhod. Gre za območje cenomanijsko-turonijskih apnencev z rudisti in menjavanje apnencev in dolomitov (slika 1), ki manj zakrasevajo kot okoliški karbonati, kar je opazno na sliki kot pas z manjšim številom vrtač na severovzhodnem delu zemljevida. Vrtače se prav tako ne pojavljajo na Brkinih, v skrajnem severovzhodnem flišnem robu ozemlja ter na jugozahodnem delu (na karbonatnih pobočjih Slavnika), saj so nakloni površja preveliki. Razlogov, zakaj so omenjeni karbonati podvrženi zakrasevanju, je lahko več in presegajo zastavljen cilj v tem prispevku, najverjetneje pa je treba razlago iskati v mikrofaciesu ter podrobni geokemični sestavi kamnine in morebitnih primesi, saj hidrogeološke lastnosti ter kemične nepravilnosti bistveno vplivajo na nastanek por in kraških kanalov. Ključno vlogo ima tudi dolomitizacija, ki tudi v najmanjši stopnji spremeni topnost kamnin ter bistveno vpliva na prepustnost in večinoma slabše zakrasevanje (Purser, Brown in Aissaoui 1994). Drug pomemben dejavnik pa je struktura oziroma tektonska poškodovanost kamnin, tako mikrorazpoke, kot tudi prelomne cone, ki imajo ključen vpliv ne le na lokacije pojavljanja vrtač, temveč tudi na njihovo obliko (Čar 2001; 2018).

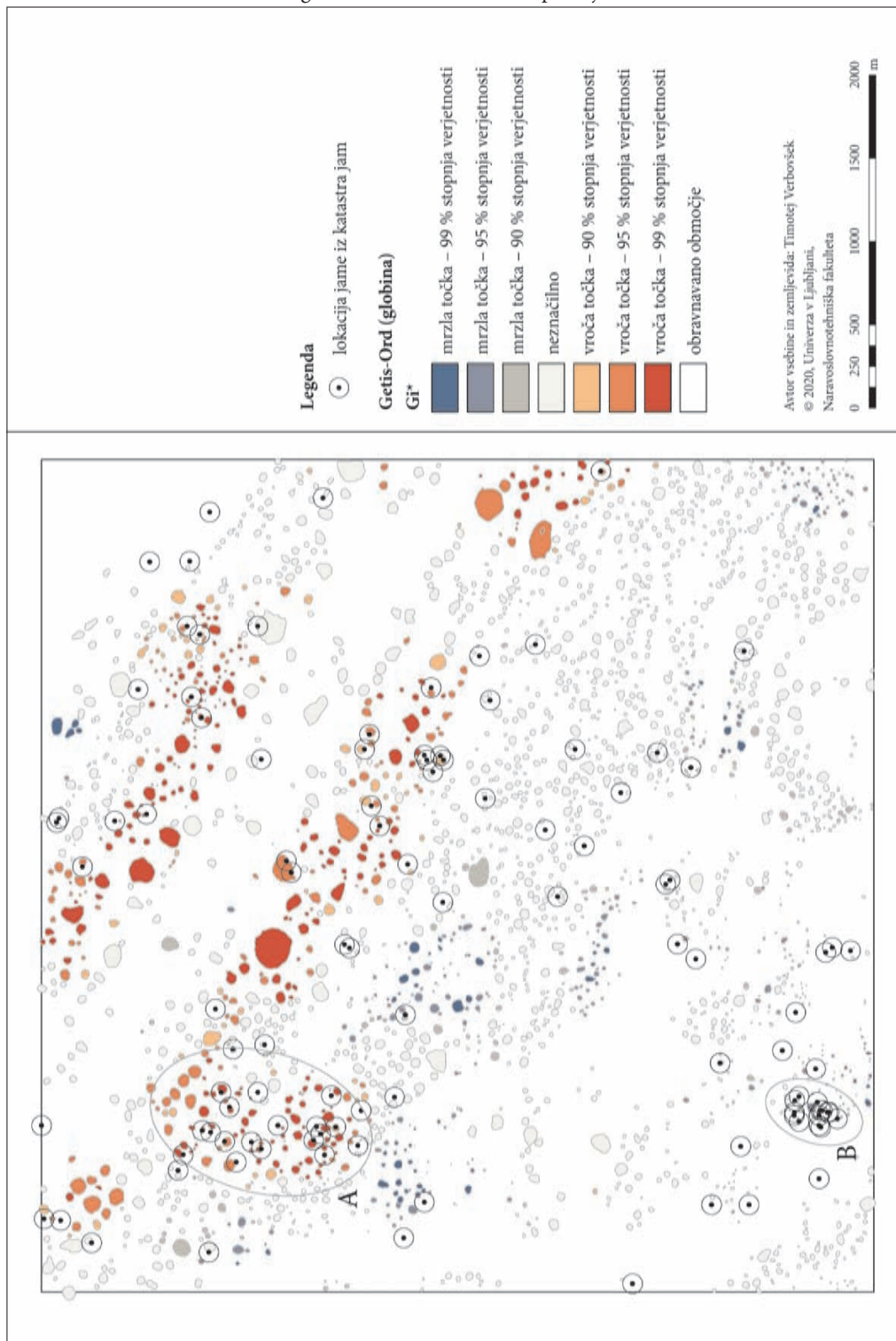
Rezultati metode *Getis-Ord* (slika 3) nasprotno od zemljevida globlin (slika 2) kažejo precej bolj zanimive rezultate. Na sliki 3 so razvidna območja vročih točk (rdeča barva) in mrzlih točk (modra barva). Dve očitni vročiji vročih točk v smeri raztezanja geoloških plasti (severozahod–jugovzhod), sta na sliki še bolj razvidni. Poleg tega sta vidni tudi dve dodatni območji, ki ju na prejšnji sliki ni bilo mogoče zaznati. Gre za območji, označeni s črkama A in B (slika 3).

Na izstopajočem območju vročih točk A je 20 jam s povprečno globino 33,5 m (povprečje je narejeno na 19 jamah, ker ena nima podatka o globini). Skupina lokacij jam je usmerjena skoraj pravokotno na smer raztezanja geoloških plasti in tako predstavlja anomalijo. Domneva, ki bi jo bilo treba preveriti na terenu, je, da gre za jamski sistem, kjer je voda tekla v smeri proti morju (torej proti jugozahodu). Danes tok podzemne vode sicer v splošnem poteka v tej smeri, vprašanje pa je, ali je bilo tako tudi v geološki zgodovini, saj je količina vod (pretok) potokov iz Brkinov danes precej manjša, kot je razvidno iz velikosti jam in ocenjenega pretoka v jamah na tem območju (Verbovšek 2003). Hidrološke razmere so zato lahko bile precej drugačne in zgolj predpostavljamo, da je bila prečna smer jamskega sistema proti jugozahodu na območju A (slika 3) enaka današnji. Razlago za vprašanje, zakaj je območje jam in vročih točk globlin vrtač skoncentrirano na manjše območje, lahko iščemo v teoriji zapornih prelomov (Šušteršič 2006b), saj ti prelomi le na določenih mestih prepustijo tok skozi sicer bolj ali manj neprepustno »zaporno« cono, nastalo zaradi tektonske spremembe hidrogeoloških lastnosti kamnin. Vrtač v območju A je 140, njihova povprečna globina je 4,80 ( $Z \geq 2,58$ , »najbolj vroče točke«). Območji

Slika 2: Globline vrtač. ► (str. 14)

Slika 3: Rezultati metode *Getis-Ord* – vroče in mrzle točke. ► (str. 15)





teh vrtač in jam zelo dobro sovpadata, torej metoda *Getis-Ord* zelo dobro predvidi vroče točke na območju pojavljanja jam. Genetsko so vrtače in jame povezane. Na širšem območju je bilo to opisano v prispevku Žvab Rožičeve, Čara in Rožiča (2015) ter tudi na ožjem območju jame Pečina v Zjatih (Verbovšek 2003).

Območje B je glede razlage bolj težavno, saj gre za dokaj neizrazito »mrzlo« območje, kjer se pojavlja le nekaj jam. Območje je bistveno manjše od območja A, predvsem pa je v nasprotju od tega območja tukaj mrzla točka; pričakujemo torej manj globoke vrtače, kar je v nasprotju z dejstvom, da se na majhnem območju pojavlja večje število jam. Tudi to območje bi bilo treba preveriti na terenu, predvsem tudi s strukturnim kartiranjem, kot je to za ožje območje jame Medvedjak naredil Vrvišar (2016).

## 4 Sklep

Na obravnavanem območju se je metoda *Getis-Ord* z izračunom indeksa  $G_i^*$  pokazala kot dokaj uporabna za določevanje lokacij jam, saj se območja njenih vročih točk, kjer smo kot kvantitativni parameter uporabili globine vrtač, prostorsko zelo dobro ujemajo z lokacijami jam iz katastra. Metoda je prepoznala območja, ki na prvi pogled niso razvidna iz samih globin vrtač. Genetsko lahko razlogo iščemo v povezanem jamskem sistemu in morebitnem zapornem prelomu, ki na določenem mestu kanalizira podzemno vodo v generalni smeri toka. Nadaljnje delo bo usmerjeno v preučevanje povezave globin vrtač z geometrijo jam oziroma njihovimi tlorisi, saj podajo več informacij kot zgolj lokacije jam. Poleg tega je potrebno tudi dodatno terensko delo, za preverbo, kako so vrtače povezane z jamskimi sistemi na tem območju.

## 5 Viri in literatura

- Basso, A., Bruno, E., Parise, M., Pepe, M. 2013: Morphometric analysis of sinkholes in a karst coastal area of southern Apulia (Italy). *Environmental Earth Science* 70. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2297-z>
- 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>
- Breg Valjavec, M. 2010: Digitalni model višin nekdanje pokrajine – primer Logaško polje (leto 1972). *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2009–2010, GIS v Sloveniji* 10. Ljubljana.
- Čar, J. 2001: Structural bases for shaping of dolines. *Acta Carsologica* 30-2.
- 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.
- De Carvalho Júnior, O. A., Guimarães, R. F., Montgomery, D. R., Gillespie, A. R., Gomes, R. A. T., De Souza Martins, É., Silva, N. C. 2014: Karst depression detection using ASTER, ALOS/PRISM and SRTM-derived digital elevation models in the Bambuí Group, Brazil. *Remote Sensing* 6-1. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs6010330>
- Doctor, D. H., Young, J. A. 2013: An evaluation of automated GIS tools for delineating karst sinkholes and closed depressions from 1-meter lidar-derived digital elevation data. *Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst: Proceedings of the Thirteenth Multidisciplinary Conference*. Carlsbad. DOI: <https://doi.org/10.5038/9780979542275.1156>
- Enyedi, P., Pap, M., Kovács, Z., Takács-Szilágyi, L., Szabó, S. 2018: Efficiency of local minima and GLM techniques in sinkhole extraction from a LiDAR-based terrain model. *International Journal of Digital Earth* 12-9. DOI: <https://doi.org/10.1080/17538947.2018.1501107>
- Faivre, S., Pahernik, M. 2007: Structural influences on the spatial distribution of dolines, Island of Brač, Croatia. *Zeitschrift für Geomorphologie* 51-4. DOI: <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2007/0051-0487>



- Ford, D., Williams, P. W. 2007: Karst Hydrogeology and Geomorphology. Chichester.
- Getis, A., Ord, J. K. 1992: The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis* 24-2. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x>
- Hrvatini, M., Perko, D. 2016: Morfometrične razlike med pokrajinskimi vročimi in mrzlimi točkami. Digitalni podatki, GIS v Sloveniji 13. Ljubljana. DOI: <https://doi.org/10.3986/9789612549305>
- Javne informacije Slovenije: Lidar DMR1. Geodetska uprava Republike Slovenije. Ljubljana, 2014
- Javne informacije Slovenije: P750. Geodetska uprava Republike Slovenije. Ljubljana, 2020.
- Jennings, J. N. 1975: Doline morphometry as a morphogenetic tool: New Zealand examples. *New Zealand Geographer* 31-1. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-7939.1975.tb00793.x>
- Jež, J., Otoničar, B., Fuček, L., Ogorelec, B. 2011: Late Cretaceous sedimentary evolution of a northern sector of the Adriatic Carbonate Platform (Matarsko Podolje, SW Slovenia). *Facies* 57. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10347-010-0249-6>
- Kobal, M., Bertoncelj, I., Pirotti, F., Kutnar, L. 2014: Lidar processing for defining sinkhole characteristics under dense forest cover: A case study in the Dinaric mountains. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 40-7. DOI: <http://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-7-113-2014>
- Lipar, P., Kostanjšek, J., Žura, M. 2010: Uporaba prostorske statistike za določevanje zgostitev prometnih nesreč. *Geodetski vestnik* 54-1. DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2010.01.061-069
- Medmrežje 1: [http://gis.arso.gov.si/evode/profile.aspx?id=atlas\\_voda\\_Lidar@Arso](http://gis.arso.gov.si/evode/profile.aspx?id=atlas_voda_Lidar@Arso) (18. 11. 2019).
- Mihevč, A. 1994: Contact karst of Brkini hills. *Acta Carsologica* 23.
- Mitchell, A. 2009: The ESRI Guide to GIS Analysis. Volume 2: Spatial Measurements and Statistics. Redlands.
- Ord, J. K., Getis, A. 1995: Local spatial autocorrelation statistics: Distributional issues and an application. *Geographical Analysis* 27-4. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00912.x>
- Perko, D., Hrvatini, M., Ciglič, R. 2017: Determination of landscape hotspots of Slovenia. *Acta geographica Slovenica* 57-1. DOI: <https://doi.org/10.3986/AGS.4618>
- Placer, L. 2008: Principles of the tectonic subdivision of Slovenia. *Geologija* 51-2. DOI: <https://doi.org/10.5474/geologija.2008.021>
- Purser, B. H., Brown, A., Aissaoui, D. M. 1994: Nature, origins and evolution of porosity in dolomites. *Dolomites: A Volume in Honour of Dolomieu*. Gent. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781444304077.ch16>
- Stepišnik, U., Ferik, M., Gostinčar, P., Černuta, P., Peternelj, K., Štembergar, T., Ilič, U. 2007: Alluvial fans on contact karst: An example from Matarsko podolje, Slovenia. *Acta Carsologica* 36-2. DOI: <https://doi.org/10.3986/ac.v36i2.189>
- Stocks, L., Shears, A. 2015: Cave density of the Greenbrier Limestone Group, West Virginia. *Papers in Applied Geography* 1-3. DOI: <https://doi.org/10.1080/23754931.2015.1014269>
- Šegina, E., Benac, Č., Rubinič, J., Knez, M. 2018: Morphometric analyses of dolines – the problem of delineation and calculation of basic parameters. *Acta Carsologica* 47-1. DOI: <http://doi.org/10.3986/ac.v47i1.4941>
- Šikić, D., Pleničar, M., Šparica, M. 1967: Osnova geološka karta SFRJ 1 : 100.000, list Ilirska Bistrica. Zvezni geološki zavod. Beograd.
- Šušteršič, F. 2006a: A power function model for the basic geometry of solution dolines: considerations from the classical karst of south-central Slovenia. *Earth Surface Processes and Landforms* 31-3. DOI: <http://doi.org/10.1002/esp.1244>
- Šušteršič, F. 2006b: Relationships between deflector faults, collapse dolines and collector channel formation: some examples from Slovenia. *International Journal Speleology* 35-1. DOI: <http://doi.org/10.5038/1827-806X.35.1.1>
- Telbisz, T., Dragušica, H., Nagy, B. 2009: Doline morphometric analysis and karst morphology of Biokovo Mt (Croatia) based on field observations and digital terrain analysis. *Hrvatski geografski glasnik* 71-2. DOI: <https://doi.org/10.21861/hgg.2009.71.02.01>

- Tičar, J., Perko, D., Volk Bahun, M. 2018: Geodediščina in pokrajinska raznolikost Slovenije. Pokrajina v visoki ločljivosti, GIS v Sloveniji 14. Ljubljana.
- Triglav Čekada, M., Bric, V. 2015: Končan je projekt laserskega skeniranja Slovenije. Geodetski vestnik 59-3.
- Verbovšek, T. 2003: Cave forms and origin of the cave Pečina v Zjatih (Matarsko podolje, Slovenia). Acta Carsologica 32-1. DOI: <https://doi.org/10.3986/ac.v32i1.369>
- Verbovšek, T., Gabor, L. 2019: Morphometric properties of dolines in Matarsko podolje, SW Slovenia. Environmental Earth Sciences 78-396. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8398-6>
- Vrviščar, B. 2016: Geološka karta kraškega ozemlja nad jamo Medvedjak na Matarskem podolju. Diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta. Ljubljana.
- White, E. L., White, W. B. 1979: Quantitative morphology of landforms in carbonate rock basins in the Appalachian Highlands. Geological Society of America Bulletin 90-4. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1979\)90%3C385:QMOLIC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1979)90%3C385:QMOLIC%3E2.0.CO;2)
- Williams, P. W. 1972: Morphometric analysis of polygonal karst in New Guinea. Geological Society of America Bulletin 83-3. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1972\)83\[761:MAOPKI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1972)83[761:MAOPKI]2.0.CO;2)
- Žvab Rožič, P., Čar, J., Rožič, B. 2015: Geological structure of the Divača area and its influence on the speleogenesis and hydrogeology of Kačna jama. Acta Carsologica 44-2. DOI: <https://doi.org/10.3986/ac.v44i2.1958>