

Prostorna gustoća ponikava na području Republike Hrvatske

Mladen Pahernik

Cilj je ovog rada utvrditi prostornu gustoću ponikava na području krša Hrvatske i provesti korelaciju izračunatih vrijednosti gustoće ponikava s pojedinim geomorfološkim i geološkim čimbenicima njihova nastanka i razvoja. Kako bi se to postiglo, potrebno je izračunati prostornu gustoću ponikava temeljem jedinstvenih GIS metoda prikupljanja i analize podataka unutar čitavoga istraživanog područja. Gustoća ponikava unutar jedinične površine izračunata je na temelju kartiranih dna ponikava. Za potrebe određivanja dna ponikava upotrijebljene su digitalne kartografske podloge u mjerilu 1 : 25.000. Na temelju dobivenih podataka izračunata je prostorna gustoća ponikava jednostavnom kernel metodom unutar površine od 1 km². Provedenom analizom prostornih razlika u intenzitetu gustoće ponikava, uočene su pojedine veze između njihova razvoja i morfometrijskih parametara reljefa, te litoloških i strukturnih obilježja terena.

Ključne riječi: krš, ponikva, gustoća ponikava, GIS, Dinaridi, Hrvatska

Spatial Density of Dolines in the Croatian Territory

This paper deals with the spatial density of dolines in the Croatian territory covered by karst. The purpose of this paper is to calculate the spatial density of dolines and show a correlation between calculated doline density values and certain geomorphological and geological factors of their origin and development. Therefore, it has been necessary to calculate the spatial density of dolines applying unique GIS methods of data collection and analysis to the entire study area.

Doline density per unit area has been calculated based on the mapped doline bottom. 1:25,000 scale digital cartographic models have been used to determine the doline bottom. The given data have been used to calculate the spatial density of dolines applying a simple kernel method to an area of one square kilometre. The analysis of spatial differences in doline density has revealed that certain connections exist between doline development and relief morphometric parameters as well as lithological and structural terrain features.

Key-words: karst, doline, doline density, GIS, the Dinarides, Croatia

Uvod

Ponikve su jedan od osnovnih reljefnih oblika vezan uz krški reljef. Široki spektar različitih oblika, dimenzija i ostalih morfometrijskih obilježja ponikava posljedica je razlika u njihovoj genezi i evoluciji, pri čemu primarnu ulogu ima korozija (Ford i Williams, 2007). Osim uz koroziju geneza ponikava može biti vezana i uz procese urušavanja podzemnih prostora te sufoziju i supkutanu koroziju unutar nevezanih klastičnih sedimenata smještenih na karbonatnu podlogu (Sauro, 2003).

Veliki broj istraživanja, prije svega morfometrijskih obilježja ponikava unutar manjih područja, usmjeren je na različitosti u litološkim i tektonskim obilježjima stijenskoga kompleksa te specifične klimatsko-biološke uvjete koji utječu na nastanak i razvoj ponikava. Osim morfološkim obilježjima ponikava znatni dio dosadašnjih istraživanja posvećen je i prostornoj gustoći, odnosno njihovu broju unutar definirane prostorne jedinice. U većem dijelu tih istraživanja pokušava se povezati recentne deformacije geoloških struktura s prostornim obilježjima distribucije gustoće ponikava. Za potrebe ovog rada prikupljeni su podaci o položaju ponikava na prostoru krša Republike Hrvatske, bez podataka o morfometrijskim obilježjima ponikava.

Statistička analiza prostornog rasporeda i distribucije ponikava uključuje primjenu prostorne analize u geomorfologiji temeljene na analizi točkastog uzorka (Williams, 1972; Vincent, 1987). Novija istraživanja prostorne distribucije i morfoloških obilježja ponikava vezana su uz primjenu metoda GIS prostorne analize. Tako Angel i dr. (2004) kompariraju klasičnu metodu računanja gustoće ponikava putem analognih kartografskih izvora te suvremenih GIS metoda, a Applegate (2003) u svom radu analizira kartiranje ponikava putem digitalnih topografskih karata s obzirom na njihov prikaz pomoću slojnica. Značajni dio istraživanja usmjeren je i na primjenu GIS metoda u definiranju različitih parametara prostorne distribucije i morfometrije ponikava (Denizman, 2003; Telbisz, 2010). Različite funkcije prostorne analize temelj su istraživanja korelacije gustoće i prostornog rasporeda ponikava s recentnim deformacijama geoloških struktura (Mihljević, 1994; Faivre i Reiffsteck, 1999; Faivre i Reiffsteck, 2002; Pahernik, 2000; Florea, 2005) te drugim geološkim i geomorfološkim parametrima njihove prostorne distribucije (Orendorff i dr., 2000; Faivre i Pahernik, 2007; Telbisz i dr., 2009). U spomenutim radovima intenzitet pojave ponikava u određenom prostoru definira se generalno četirima osnovnim čimbenicima: litološkim, strukturnim, tektonskim i klimatskim. Detaljnije o razlikama u gustoći ponikava slovenskoga Krasa pišu Mihevc (1998), koji uz klasične čimbenike razvoja ponikava uvrštava i nagib padine i dimenzije samih ponikava, te Gams (2000) s analizom korozijskih čimbenika kao osnove za nastanak korozijskih ponikava. To su višak padalina u odnosu na potencijalnu evapotranspiraciju, propusnost tla, razina podzemne vode i korozijska fronta (kontakt agresivne i sigotvorne vode) dublje pod površinom, nagib zemljišta manji od 30° i kompaktna stijena.

Istraživanja gustoće ponikava na prostoru krša Hrvatske vezana su uz regionalna geomorfološka istraživanja u funkciji morfostrukturnih analiza te analiza krškog reljefa. Gustoća ponikava na jediničnu površinu, najčešće 1 km², računa se metodom brojenja uzoraka s listova topografskih karata u mjerilima 1 : 25.000 i 1 : 50.000 unutar kvadrata pravokutne koordinatne mreže Gauß-Krügerove projekcije. Za prostor Ličko-goranske

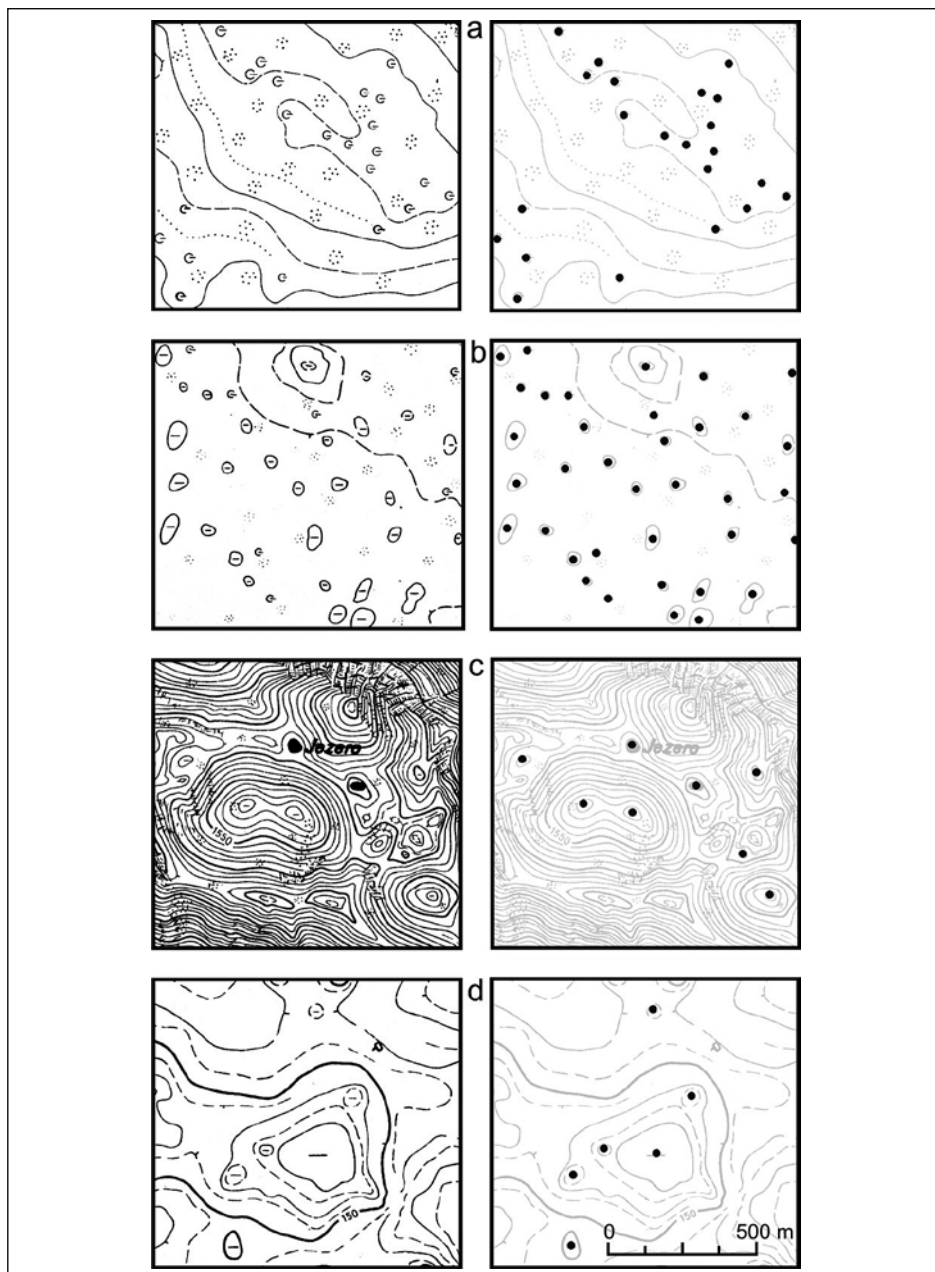
regije u sklopu morfografske i morfometrijske analize reljefa Klein (1976) računa prostornu gustoću ponikava. Slijede radovi Mihljević i Prelogović (1992) i Mihljević (1995) za prostor Učke i Čičarije, Faivre (1992) za prostor Senjskog bila i Sjevernog Velebita te Faivre (1999) za cijeli Velebit u sklopu morfostrukturnih analiza tih područja. Kernel metoda računanja gustoće pojave unutar GIS prostornih analiza primijenjena je u određivanju gustoće ponikava Gorskoga kotara (Pahernik, 2005), a ista metoda upotrijebljena je i kod analize gustoće ponikava Samoborskoga i Žumberačkoga gorja (Buzjak, 2006) te Slunjske zaravni (Bočić, 2009). U spomenutim radovima regionalnoga karaktera iznose se zaključci vezani uz prostorne razlike u gustoći ponikava uvjetovane litološkim razlikama u vidu udjela CaCO_3 , odnosno $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, morfometrijskim obilježjima reljefa s naglaskom na nagib padina, intenzitetom korozije, strukturom vezanom uz položaj ponikava u okviru same strukture te pružanje i pad slojeva, te tektonikom preko sustava pukotina i aktivnih rasjeda (Mihljević, 1995). Tome valja pridodati i klimatske čimbenike, kroz globalne klimatske promjene tijekom neotektonske etape razvoja, te recentne mikroklimatološke čimbenike na koje utječu visina reljefa, ekspozicija i nagib padina te vertikalna raščlanjenost reljefa (Faivre, 1992). Unutar analiza prostornog rasporeda ponikava kao indikatora tektonske aktivnosti u području Velebita Faivre i Reiffsteck (1999) navode kako je opća lokacija nastanka ponikve određena litološkim i klimatskim uvjetima, a precizna lokacija tektonskim režimom. Suvremena istraživanja veze tektonike i površinskih krških oblika pokazuju kako su reljefni oblici usko povezani s općim obilježjima recentnog polja stresa, koji je u bliskoj vezi s distribucijom ponikava zajedno s recentnim deformacijama prostora (Faivre i Reiffsteck, 2002).

Kako u dosadašnjim istraživanjima postoje samo fragmentarni podaci o prostornom rasporedu ponikava u krškom reljefu Republike Hrvatske, cilj je ovog rada jedinstvenom metodom prikupiti i pohraniti položaj ponikava te izračunati i analizirati njihovu prostornu gustoću. Za pohranu i analizu prostornih podataka upotrijebljen je programski paket ArcGIS v. 9.3 tvrtke ESRI s modulom Spatial Analyst.

Metode istraživanja

Najopsežniji dio istraživanja vezan je uz postupak prikupljanja podataka. Podaci o položaju dna ponikve prikupljeni su s topografskih karata mjerila 1 : 25.000 u izdanju Vojno-geografskog instituta iz Beograda. Listovi topografskih karata Gauß-Krügerove projekcije 5. i 6. zone (Besellov elipsoid) nakon skeniranja su geokodirani u sustav Gauß-Krügerove projekcije (Besellov elipsoid) sa središnjim meridijanom $16^{\circ}30'$ i linearnim mjerilom na središnjemu meridijanu od 0,9997. U fazi vektorizacije prostornog položaja ponikava u bazu podataka unosila se točka koja reprezentira dno ponikve. Pritom su kartirana sva dna ponikava, bilo da su posrijedi male ponikve prikazane signaturama na topografskim kartama, jednostavne ponikve s jednim dnom, složene ponikve s dva ili više dna ili sekundarne ponikve koje se javljaju na padinama većih ponikava (sl. 1). Time su u prostornoj bazi podataka dobiveni podaci o položaju dna ponikava nad kojim je provedena prostorna analiza gustoće točkastog uzorka.

Metode prostorne gustoće točkastog uzorka dijele se na dvije skupine. Prva se temelji na broju pojave unutar određene jedinične površine, a druga je vezana uz kernel metode



Sl. 1. Izdvojeni primjeri kartiranja dna ponikava; manje ponikve prikazane signaturom (a), jednostavne ponikve (b), složene ponikve s dva ili više dna i vodom ispunjene ponikve (c) te složene ponikve s više sekundarnih ponikava (d)

Fig. 1 Examples of mapping the doline bottom; smaller dolines shown by signature (a), simple dolines (b), complex dolines having two or more bottoms and water-filled dolines (c), and complex dolines having secondary dolines (d).

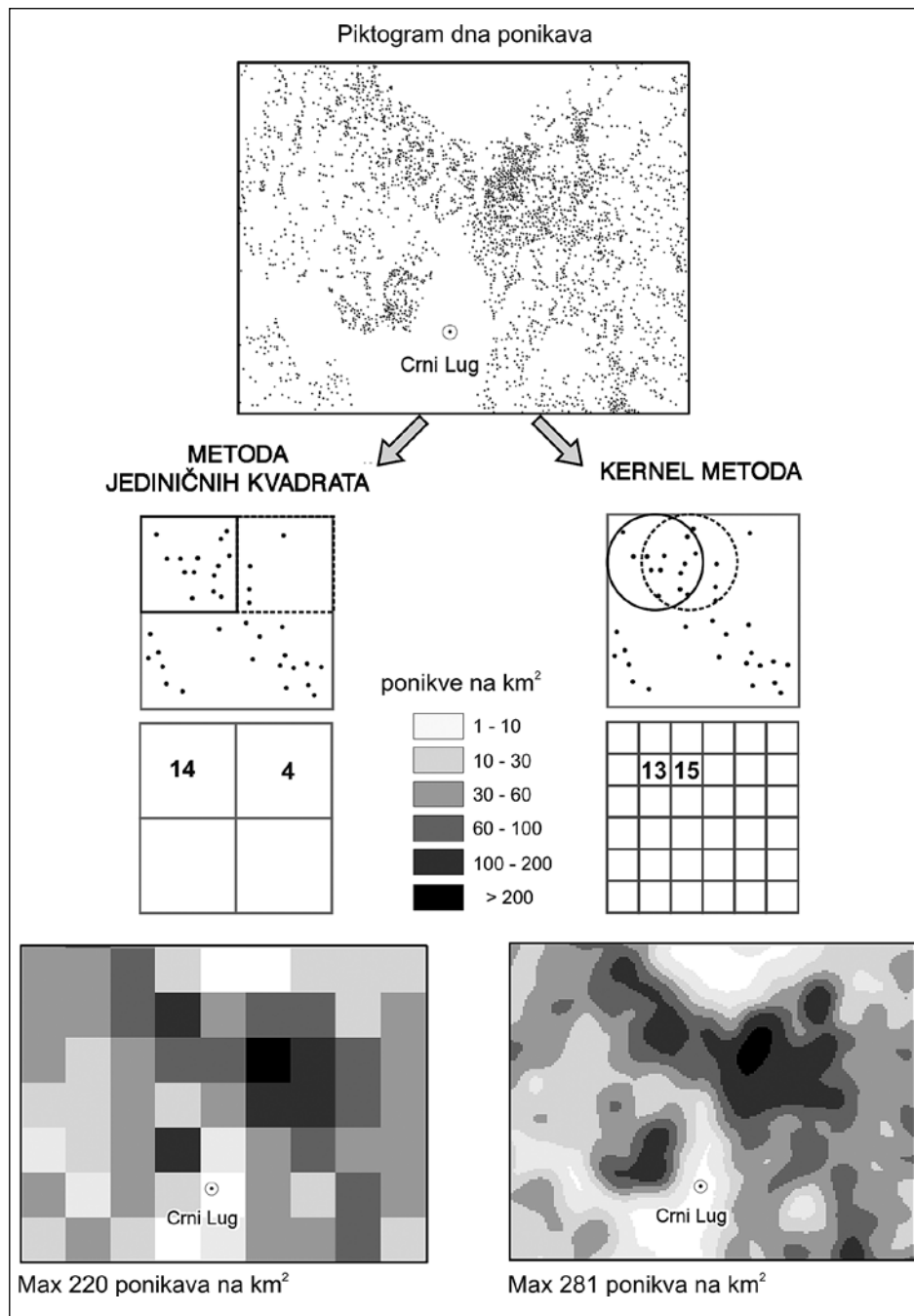
proračuna gustoće (O'Sullivan i Unwin, 2003). Za potrebe ovog rada metoda analize prostorne gustoće točkastog uzorka uključila je jednostavnu kernel metodu proračuna gustoće. Osim jednostavne kernel metode poznat je i čitav niz različitih metoda kernelovih funkcija, gdje izračunata gustoća ne ovisi samo o broju pojave unutar jedinične površine nego i o udaljenosti pojava od lokacije na kojoj se računa gustoća. Tako bliži susjedi imaju veću težinu od udaljenijih u proračunu lokalne gustoće uzorka (Silverman, 1986; Brundson, 1995).

Kernel metoda u osnovi predstavlja fokus metodu analize susjedstva kod kontinuiranih podataka prikazanih rasterom (Mitchell, 1999). Temeljna je zamisao metode da točkasti uzorak ima određenu gustoću na bilo kojoj lokaciji unutar sebe, a ne samo na onoj gdje se pojedina pojava nalazi. Jednostavnom kernel metodom gustoća pojave uzorka predstavlja vrijednost broja pojave unutar kruga radijusa r čije se središte nalazi na lokaciji t . Pritom su lokacije t definirane ćelijama pravilne rasterske mreže (grid) unutar istraživanog područja. Time je gustoća pojave λ_t (1) na lokaciji t određena:

$$\lambda_t = \frac{br \cdot [S \in K(t, r)]}{\pi r^2}, \quad (1)$$

gdje je br : broj točaka (dna ponikava) koje čine skup S i pripadaju krugu $K(t, r)$ radijusa r , sa središtem na lokaciji t . Nakon proračuna broja pojave unutar kruga $K(t, r)$ slijedi pomak na sljedeću lokaciju $t + 1$ i tako redom dok se ne dobije vrijednost gustoće pojave unutar promatranog uzorka za sve ćelije rasterske mreže (sl. 2). Osnovno pitanje kod primjene kernel metode proračuna gustoće prostornog uzorka jest određivanje vrijednosti radijusa r kruga K . Ako je radijus velik, izračunata gustoća pojave (λ_t) unutar promatranog uzorka bit će svugdje podjednaka i približavat će se vrijednosti prosječne gustoće u danom uzorku. Kod male vrijednosti radijusa r gustoća uzorka bit će vezana uz pojedinu pojavu uzorka, a ne gustoću u njegovu okružju. U provedenim istraživanjima za određivanje prostorne gustoće ponikava uzeta je površina kruga 1 km^2 , koja odgovara radijusu od 564 metra. Time je određena jedinična površina gustoće pojave prilagođena cijelome istraživanom prostoru. Zbog razlika u metodi računanja gustoće ponikava dobivene vrijednosti kernel metodom, u ovom radu nešto su više od vrijednosti dobivene metodom brojenja pojave unutar jedinične površine unutar istog područja. Razlika proizlazi iz rezolucije dobivenih uzoraka, gdje se kod kernel metode određuje i gustoća u graničnom dijelu između dvije jedinične površine metode jediničnih kvadrata (sl. 2). Tako je npr. metodom jediničnih kvadrata izračunata maksimalna gustoća u području S. Velebita i Senjskog bila 97 pon/km² (Faivre, 1992) ili u području Velike Kapele 173 pon/km² (Pahernik, 1997). Kernel metodom izračunata je maksimalna gustoća ponikava na S. Velebitu 120 pon/km², a na Velikoj Kapeli 243 pon/km².

Nakon završetka procesa vektorizacije i uspostave prostorne baze podataka položaja ponikava prišlo se određivanju prosječne pogreške uzorka. Pogreške nastale prilikom prikupljanja podataka posljedica su mogućeg umora, a time i smanjenja pozornosti onoga tko podatke prikuplja, loše kvalitete digitalne kartografske podloge, složenoga kartografskog prikaza gdje dolazi do međusobnog preklapanja grafičkih simbola i signatura različitih topografskih objekata i dr. Za kontrolu prikupljenih uzoraka slučajnim je odabirom izdvojeno dvjesto polja veličine 1 km^2 na kojima je napravljen detaljan pregled položaja



Sl. 2. Razlike u metodi jediničnih kvadrata i kernel metodi računanja prostorne gustoće ponikava
 Fig. 2 Differences between the unit square method and kernel methods used to calculate the spatial density of dolines.

ponikava koristeći se dodatnim izvorima u obliku orohidrografskih kartografskih podloga i ortofoto snimaka. Usporedbom kontrolnih rezultata i rezultata primarne digitalizacije dobivene su sljedeće vrijednosti:

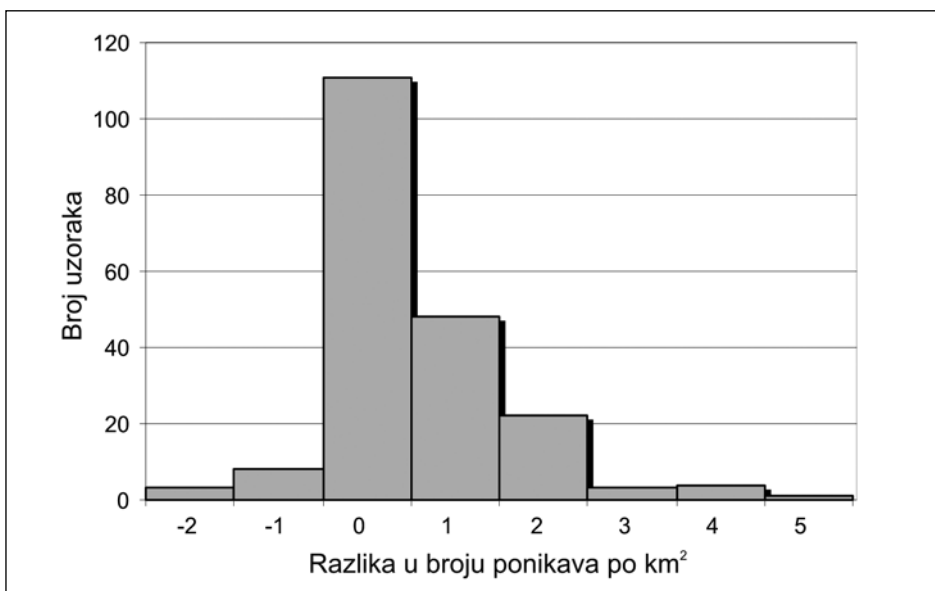
Broj vektoriziranih ponikava: 11.260

Broj kontroliranih ponikava: 11.359

Razlika: +99

Srednja pogreška po km²: 0,49

Postotna pogreška: 0,87%.



Sl. 3. Histogram distribucije razlika u broju ponikava na km² između prikupljenog i naknadno kontroliranog broja ponikava

Fig. 3 Frequency histogram distribution of differences in the number of dolines per km² between registered and subsequently controlled dolines.

Dijagram distribucije razlika kontroliranog i digitaliziranog broja ponikava unutar 1 km² (sl. 3) jasno upućuje na desnostranu, odnosno pozitivnu asimetriju. To možemo tumačiti značajnijim prirastom pogrešaka izostavljanjem ponikava u odnosu na vektorizaciju oblika koji nisu ponikve. Od ukupno kontroliranih polja, unutar njih 111 (55,6%) nije zabilježena pogreška u vektorizaciji. Detaljnom analizom pogrešaka utvrđeno je da su one najčešće vezane uz izostavljanje ponikava (87,5%) te u manjem dijelu uz vektorizaciju uzvišenja kao ponikve (5,3%), zamjenu signature vrste tla ponikvom (3,2%) te zamjenu signature grmlja ponikvom i manjih rubnih dijelova šuma za izohipse ponikve (2%).

Rezultati i rasprava

Na području teritorija Republike Hrvatske utvrđeno je 376.706 ($\pm 0,87\%$) ponikava. Pritom su na prostoru dinarskoga krša registrirane 372.082 ponikve, odnosno 98,8% ukupnog broja ponikava. Izvan dinarskoga krša registrirane su 4.624 ponikve (1,2%), i to najviše na prostoru Žumberka – 3.249 ponikava, Banovine (sjeverne padine Zrinske gore) 313 ponikava, Papuka 283 ponikve, Varaždinsko-topličkog pobrđa 244 ponikve, Medvednice 225 ponikava, u širem prostoru Ravne gore 121 ponikva te na području Psunja i Pakračke gore 109 ponikava.

Na temelju točkastog uzorka prostornog rasporeda ponikava prišlo se izračunu gustoće ponikava na km^2 prema jednostavnoj kernel metodi. Najveća prostorna gustoća iznosi 281 ponikvu na km^2 i nalazimo je u području Gorskoga kotara sjeverno od Crnog Luga. Gustoću preko 200 ponikava na km^2 nalazimo još SI od Plaškoga u području Janja gore ($257 \text{ pon}/\text{km}^2$), istočno od Ogulina u području Bukovice ($247 \text{ pon}/\text{km}^2$), JI od Primljišlja ($217 \text{ pon}/\text{km}^2$), SI od Ogulina ($211 \text{ pon}/\text{km}^2$) te istočno od Tounja ($207 \text{ pon}/\text{km}^2$). Temeljem izračunatih vrijednosti i obilježja njihove distribucije određeno je šest razreda gustoće ponikava (tab. 1; sl. 8).

Tab. 1. Površine definiranih razreda gustoće ponikava

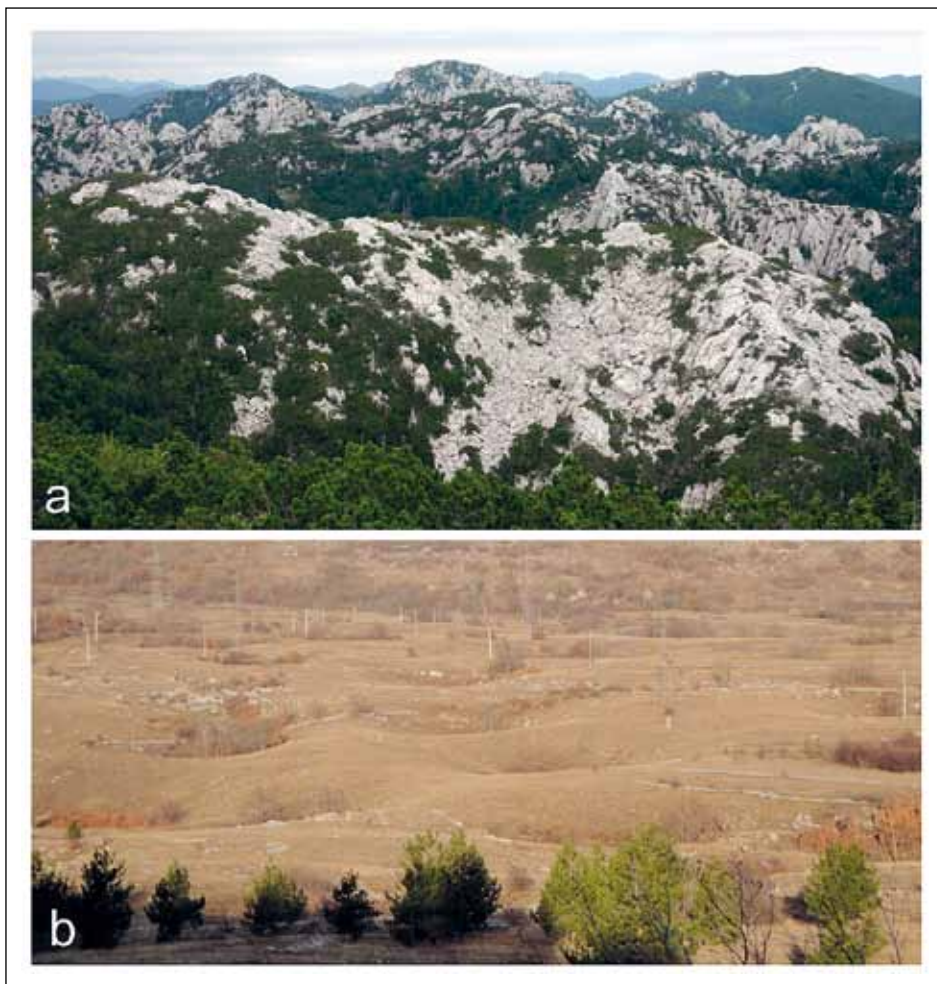
Tab. 1. Surfaces with defined classes of doline density

Rb	Raspon [pon/km^2]	Opis	Površina [km^2]
1	1 – 10	Neznatna gustoća	9.170,23
2	10 – 30	Mala gustoća	5.212,60
3	30 – 60	Srednja gustoća	3.000,22
4	60 – 100	Velika gustoća	1.359,59
5	100 – 200	Vrlo velika gustoća	382,80
6	<200	Izrazito velika gustoća	3,03

Dobivene vrijednosti gustoće ponikava odnose se na njihov apsolutni broj unutar površine od 1 km^2 bez obzira na morfometrijska obilježja same ponikve. Ta činjenica sigurno otežava korelaciju gustoće ponikava te promatranih geomorfoloških i geoloških čimbenika njihova razvoja, jer oni ne utječu samo na njihovu pojavu već i na dimenziju i oblik. S druge strane, svakako volumen ponikava, odnosno opseg njihova ruba obrnuto proporcionalno utječe i na prostornu gustoću (sl. 4). Tako Telbisz (2010) ističe kako je protokom vremena povećanje površine oboda ponikve obično povezano s opadanjem gustoće ponikava.

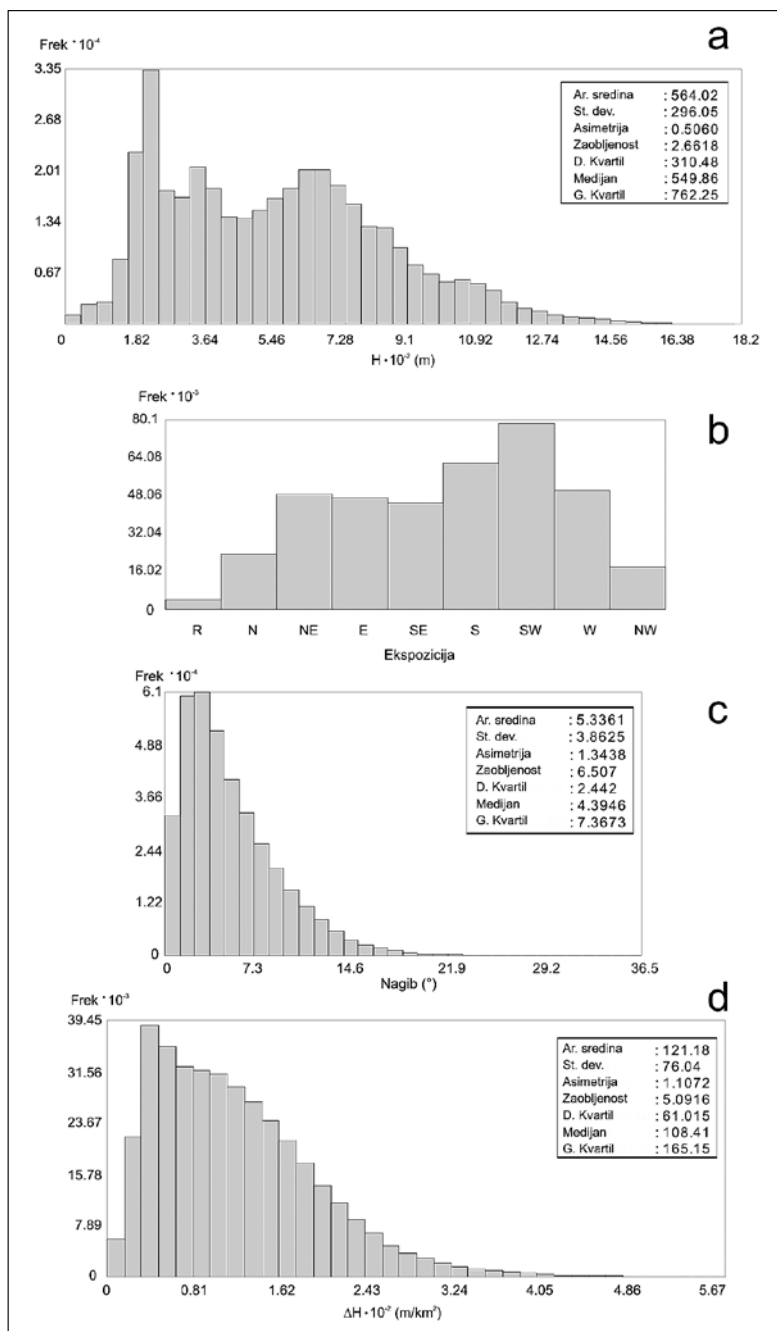
Gustoća ponikava i morfometrijski parametri reljefa

Unutar korelacije gustoće ponikava i morfometrijskih parametara reljefa provedena je analiza gustoće ponikava s hipsometrijskim odnosima reljefa, ekspozicijom i nagibom padina te vertikalnom raščlanjenosti reljefa. Opisni podaci vezani uz morfometrijska obilježja reljefa položaja pojedine ponikve izračunati su preklapanjem točkastog sloja ponikava preko rasterskih podloga odgovarajućega morfometrijskog parametra.



Sl. 4. Dimenzije ponikava kao direktna posljedica razlike u prostornoj gustoći; velike urušne ponikve (a) u području Rožanskih kukova (Sjeverni Velebit) i male korozijske ponikve (b) na Mazinskom polju (Lika)
Fig. 4 Doline dimensions as a direct cause of differences in spatial density. Large collapse dolines (a) in the area of Rožanski Kukovi at North Velebit and small corrosion dolines (b) in Mazinsko Polje in Lika.

Histogram nadmorske visine ponikava (sl. 5a) upućuje na više modalnu distribuciju, a to na heterogenost razmještaja ponikava prema visinskim razredima. Primarna koncentracija visina na kojima su razvijene ponikve od oko 200 metara posljedica je njihove velike gustoće u području starijih denudacijskih razina zaravnavanja Unsko-koranske i Istarske zaravni. Ponovni porast broja ponikava na 350 metara nadmorske visine vezan je uz veliku gustoću ponikava u višim dijelovima spomenutih zaravni, ali i pojavu znatne gustoće ponikava u Dalmatinskoj zagori unutar tih visina. Vrh distribucije ponikava u vrijednostima od oko 700 metara nadmorske visine javlja se zbog pojačane gustoće ponikava po dnu



Sl. 5. Histogrami distribucije ponikava prema hispometriji (a), ekspoziciji (b), nagibu padina (c) te vertikalnoj raščlanjenosti reljefa (d)

Fig. 5 Doline distribution according to hypsometry (a), exposition (b), slope inclination (c), and the vertical relief dissection (d).

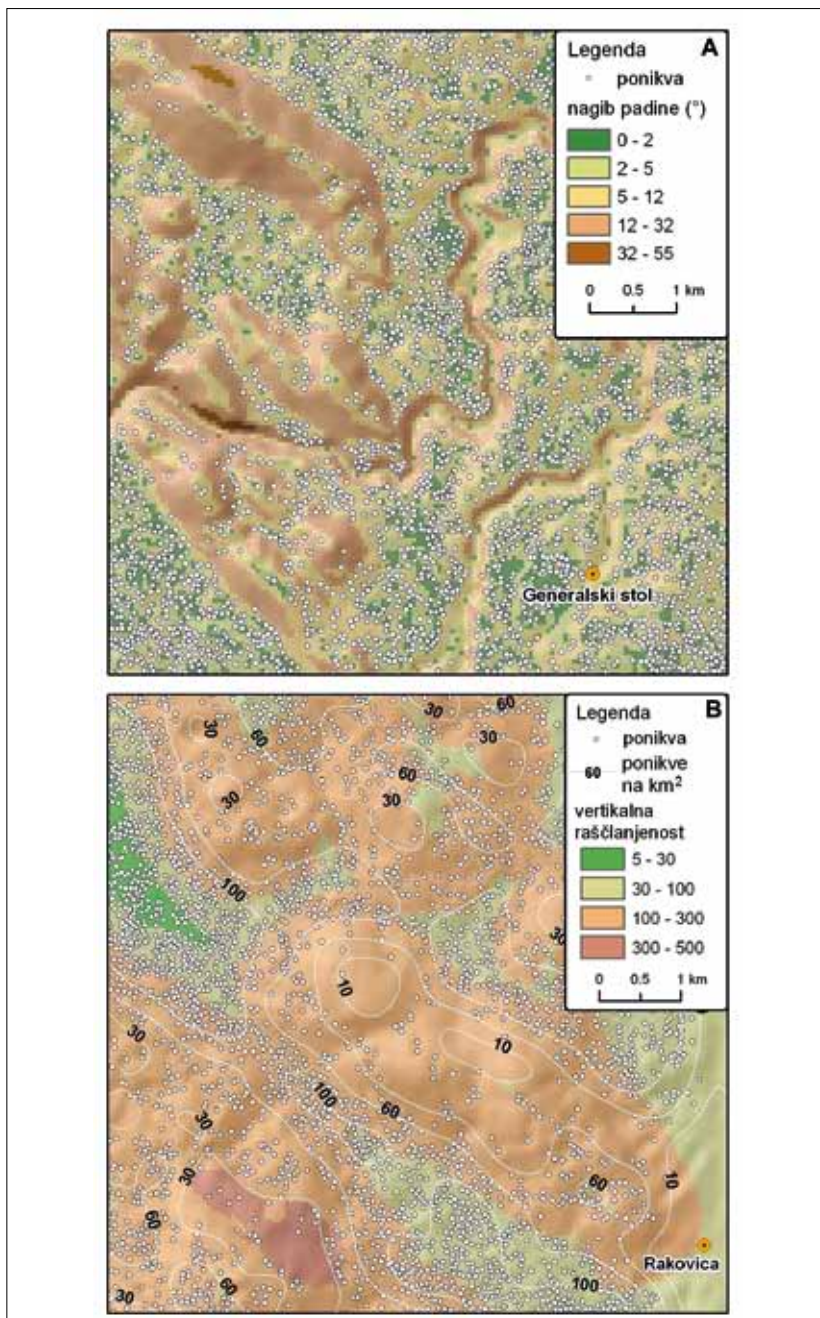
većih uvala, duliba te pedimenata gorskih uzvišenja unutar Žumberka, Ćićarije, Gorskoga kotara, Velike i Male Kapele te Velebita. Manji porast gustoće ponikava na visinama od oko 1000 metara moguće je objasniti još uvijek dovoljno velikom površinom tih visina gdje je na manjim nagibima razvijena znatnija gustoća ponikava. Ističu se područja JI dijela Ćićarije (V. Planik, 1272 m), Risnjak (1528 m), središnji niz gorskih hrptova Velike Kapele (Burni Bitoraj, 1386 m – Velika Javornica, 1374 m – Bitoraj, 1140 m), Velebit, JI dio Ličke Plješevice (Ozeblin, 1675 m), Dinara, Svilaja i Biokovo.

Histogram ekspozicije padina (sl. 5b) na kojima su razvijene ponikve pokazuje očekivanu bimodalnu distribuciju. Tako su dva vrha te distribucije JZ i SI orijentacije vezana uz padine okomite na dominantan smjer pružanja gorskih hrptova Dinarida. Veću gustoću ponikava na JZ padinama u odnosu na SI moguće je pripisati pojačanom intenzitetu različitih egzomorfoloških čimbenika koji djeluju na pojačanu mehaničku, a time i kemijsku destrukciju stijenske mase i na kraju veću pojavu ponikava.

Najznačajnija veza između gustoće ponikava i morfometrijskih obilježja reljefa ustanovljena je s nagibom padina i vertikalnom raščlanjenosti reljefa (Faire, 1992; Mihljević, 1995; Denizman, 2003; Pahernik, 1997; Bočić, 2009; Telbisz, 2010) (sl. 6). Pojava ponikava vrlo je velika na blago nagnutim terenima ($2 - 5^\circ$), gdje se prosječno javlja 35 pon/km^2 , a nešto je niža na zaravnjenim terenima ($0 - 2^\circ$) s 27 pon/km^2 , odnosno na nagnutom terenu ($5 - 12^\circ$) s prosječnom gustoćom od 21 pon/km^2 . Malu gustoću ponikava od 4 pon/km^2 nalazimo još u kategoriji znatno nagnutih terena ($12 - 32^\circ$). Uzrok manjoj prosječnoj gustoći ponikava unutar kategorije zaravnjenog reljefa valja tražiti u činjenici da je ona primarno zastupljena unutar dna polja u kršu. Kako su dna polja najčešće i područja akumulacije velike količine kvartarnih nevezanih sedimenata različita genetskog postanka, starije generacije ponikava prekrivene su mlađim sedimentima, odnosno relativno kratko razdoblje izloženosti koroziji nije omogućilo stvaranje većeg broja udubljenja koja bi bila zabilježena unutar ekvidistance karata mjerila $1 : 25.000$. To potvrđuje i gustoća ponikava razvijenih na dnu zavalu polja. Tako se unutar Ogulinsko-oštarijskog polja nalaze 1582 ponikve, s prosječnom gustoćom od $0,02 \text{ pon/km}^2$, pri čemu je veći broj ponikava vezan uz rubni SZ povišeni dio polja. Slične odnose nalazimo i kod Gackog polja s 598 ponikava ($0,01 \text{ pon/km}^2$), Ravnogorskog polja s 537 ponikava ($0,11 \text{ pon/km}^2$), Ličkog polja s 447 ponikava ($0,001 \text{ pon/km}^2$), Mazinskog polja s 444 ponikve ($0,09 \text{ pon/km}^2$) itd.

Očekivano je najveća prosječna gustoća ponikava na blago nagnutim padinama kao posljedica velike zastupljenosti te kategorije na fragmentima starijih denudacijskih razina zaravnavanja kao što su Istarska, Unsko-koranska, u okolici Klane, na otocima Krku i Braču i dr., a koje su procesima okršavanja najvjerojatnije bile izložene od mlađeg paleogena do danas (Bognar, 1994). Smanjenje prosječne gustoće ponikava u višim razredima nagiba padina povezujemo s bržim procjeđivanjem i manjim zadržavanjem padalina i vode sniježnice na većim nagibima (Faire, 1992) te vezom viših kategorija nagiba i aktivnih tektonskih zona (Mihljević, 1995).

Distribucija vrijednosti vertikalne raščlanjenosti padina (sl. 5d) pomaknuta je više udesno, što upućuje na to da je koncentracija pojave ponikava vezana uz više vrijednosti razreda slabo raščlanjenog reljefa ($30 - 100 \text{ m/km}^2$) i niže vrijednosti razreda umjereno raščlanjenog reljefa ($100 - 300 \text{ m/km}^2$). Odnos kvantila upućuje na veću koncentraciju



Sl. 6. Odnos prostornog razmještaja ponikava u odnosu na nagib padina (A) i vertikalnu raščlanjenost reljefa (B) na izdvojenom primjeru

Fig. 6 Spatial distribution of dolines in relation to slope gradient (A) and vertical relief dissection (B) is shown in the distinct example.

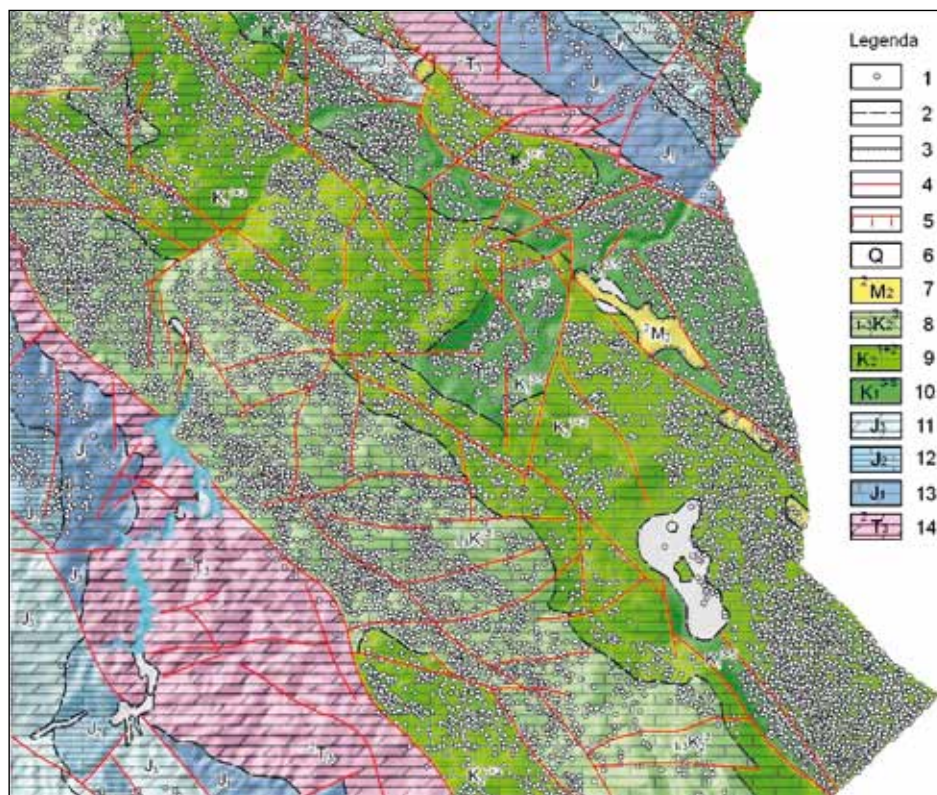
ponikava u kategoriji slabo raščlanjenog reljefa, što potvrđuje i prosječna gustoća ponikava od 26,1 pon/km² u toj kategoriji. Odnos gustoće ponikava u razredima većim i manjim od te kategorije upućuje na gotovo normalnu distribuciju pojave. Tako je prosječna gustoća pojave u nižoj kategoriji, slabo raščlanjene ravnice (5 – 30 m/km²) od 17,5 pon/km², približna gustoći u kategoriji umjereno raščlanjenog reljefa (100 – 300 m/km²) od 18,6 pon/km², a gustoća ponikava u kategoriji ravnica (0 – 5 m/km²) od 4,6 pon/km² približna gustoći u kategoriji izrazito raščlanjenog reljefa (300 – 800 m/km²) od 6,2 pon/km². U korelaciji gustoće ponikava i vertikalne raščlanjenosti reljefa još je naglašeniya pojava izrazito male gustoće ponikava na najnižim kategorijama vertikalne raščlanjenosti reljefa. Osim opisanog razloga identičnog nagibu padina, u ovom slučaju moramo dodati i činjenicu da su najniže kategorije vertikalne raščlanjenosti vezane samo uz središnje zaravnjene dijelove zavale polja. Pojava humaka te blizina ruba polja direktno utječu i na porast raščlanjenosti. Svakako valja naglasiti da se relativno mala gustoća ponikava u području malih vrijednosti vertikalne raščlanjenosti reljefa veže uz činjenicu da i same ponikve svojom dubinom pridonose raščlanjenosti tog područja.

Utjecaj litologije na gustoću ponikava

Litologiju možemo smatrati primarnim čimbenikom razvoja ponikava jer bez karbonatnih naslaga, na površini i blizu nje nema ni oblikovanja krških oblika. Preklapanjem sloja ponikava s geološkom kartom Republike Hrvatske (Hrvatski geološki institut, 2009a) utvrđen je u panonskom dijelu Hrvatske najveći razvoj ponikava na vapnencima i dolomitima donje jure i „Scaglia” vapnencima gornje krede (Žumberačka gora); slijede karbonatne naslage neogenske starosti – bioakumulirani vapnenci (litavac) badenske starosti (Banovina, Varaždinsko-topličko pobrđe, Medvednica, Moslavačka gora i sjeverni obronci Papuka) te na karbonatima trijaskne starosti; dolomitne naslage gornjeg trijasa (Žumberak) i karbonatne naslage srednjega, sporadično i donjeg trijasa (Medvednica, Ravna gora, središnji dio Papuka). Omjer površine pojedine litostratigrafske jedinice (Hrvatski geološki institut, 2009b) i broja razvijenih ponikava unutar nje u prostoru krša Dinarida pokazuje najveći razvoj u vapnencima i dolomitima donjokredne starosti (oko 25 pon/km²). Nešto manja gustoća zabilježena je unutar karbonata jurske starosti (oko 20 pon/km²). Iako je zbog generalizacije litoloških obilježja teško odrediti razliku između gustoće ponikava u vapnencima i dolomitima, na opći trend smanjene gustoće ponikava na dolomitnim naslagama upućuje gustoća ponikava unutar, u najvećem dijelu, čistih dolomita gornjotrijaskne starosti od 12 pon/km². Najveća gustoća ponikava u vapnencima i dolomitima donje krede i gornje jure zabilježena je i u većini regionalnih geomorfoloških istraživanja Dinarida. Tako u području Slunjske zaravni Bočić (2009) najveću gustoću ponikava mjeri u područjima izgrađenim od vapnenaca i dolomita gornje jure (kimeridž-titon 49,4 pon/km²; oksford-kimeridž, 60,6 pon/km²) te vapnenaca i dolomita donje krede (53,1 pon/km²). Autor ističe kako je velika gustoća ponikava u tim litostratigrafskim jedinicama najvjerojatnije posljedica činjenice da u njima prevladavaju vapnenci. Pahernik (1997) za prostor Velike Kapele navodi podatak o gustoći ponikava od 32,9 pon/km² na karbonatima jurske starosti, u odnosu na 40,9 pon/km² na vapnencima kredne starosti. Veću gustoću ponikava na krednim vapnencima autor pripisuje, osim većem udjelu vapnenaca, i jačoj tektonskoj razlomljenosti krednih sedimenata koji unutar istraživanog područja tvore

prostranu sinklinalu razlomljenu većim brojem uzdužnih (SZ – JI) i poprečnih (SI – JZ) rasjeda.

Promatrajući prostor istraživanja kroz globalnu razinu, možemo govoriti o određenoj vezi između litostratigrafskih obilježja stijenskoga kompleksa i razvoja ponikava. U prilog tome idu i razlike u gustoći ponikava unutar pojedinih genetskih tipova reljefa (Bognar i dr., 2012) u kojima je zabilježena značajnija gustoća ponikava. Tako prosječna gustoća ponikava unutar krškoga genetskog tipa reljefa (pretežito vapnenci) iznosi 15,2 pon/km² (334.876 ponikava na 22.045,6 km²), a fluviokrškoga (pretežito dolomiti) 12,0 pon/km²



Sl. 7. Odnos geološke građe (Polšak i dr., 1976; Polšak i dr., 1978) i prostornog rasporeda ponikava u širem prostoru Plitvičkih jezera: 1) ponikva; 2) normalna geološka granica; 3) transgresivna geološka granica; 4) rasjed bez oznaka obilježja; 5) reversni rasjed; 6) kvartarni sedimenti; 7) konglomerati, lapori, gline i pijesak – srednji miocen; 8) rudistni vapnenci – senon; 9) pretežito uslojeni vapnenci s ulošcima dolomita – cenoman-turon; 10) vapnenci i dolomiti – barem-apt-alb; 11) dolomiti – malm; 12) uslojeni vapnenci – doger; 13) vapnenci i vapneni dolomiti – lijas; 14) dolomiti – gornji trijas

Fig. 7 Relation between geological structure (Polšak and others, 1976, 1978) and the spatial distribution of dolines in the wide area of Plitvice Lakes. 1) doline; 2) normal geologic contact; 3) transgressive geologic contact; 4) fault without defined character; 5) reverse fault; 6) quaternary; 7) conglomerates, marls, clays and sand - Middle Miocene; 8) rudist limestones – senon; 9) predominantly layered limestones with dolomite - Cenomanian-Turonian; 10) limestones and dolomites - Barremian – Aptian – Albian 11) dolomite - Malm 12) layered limestones – Dogger 13) Limestones and dolomitic limestone – Lias 14) dolomites - Upper Triassic.

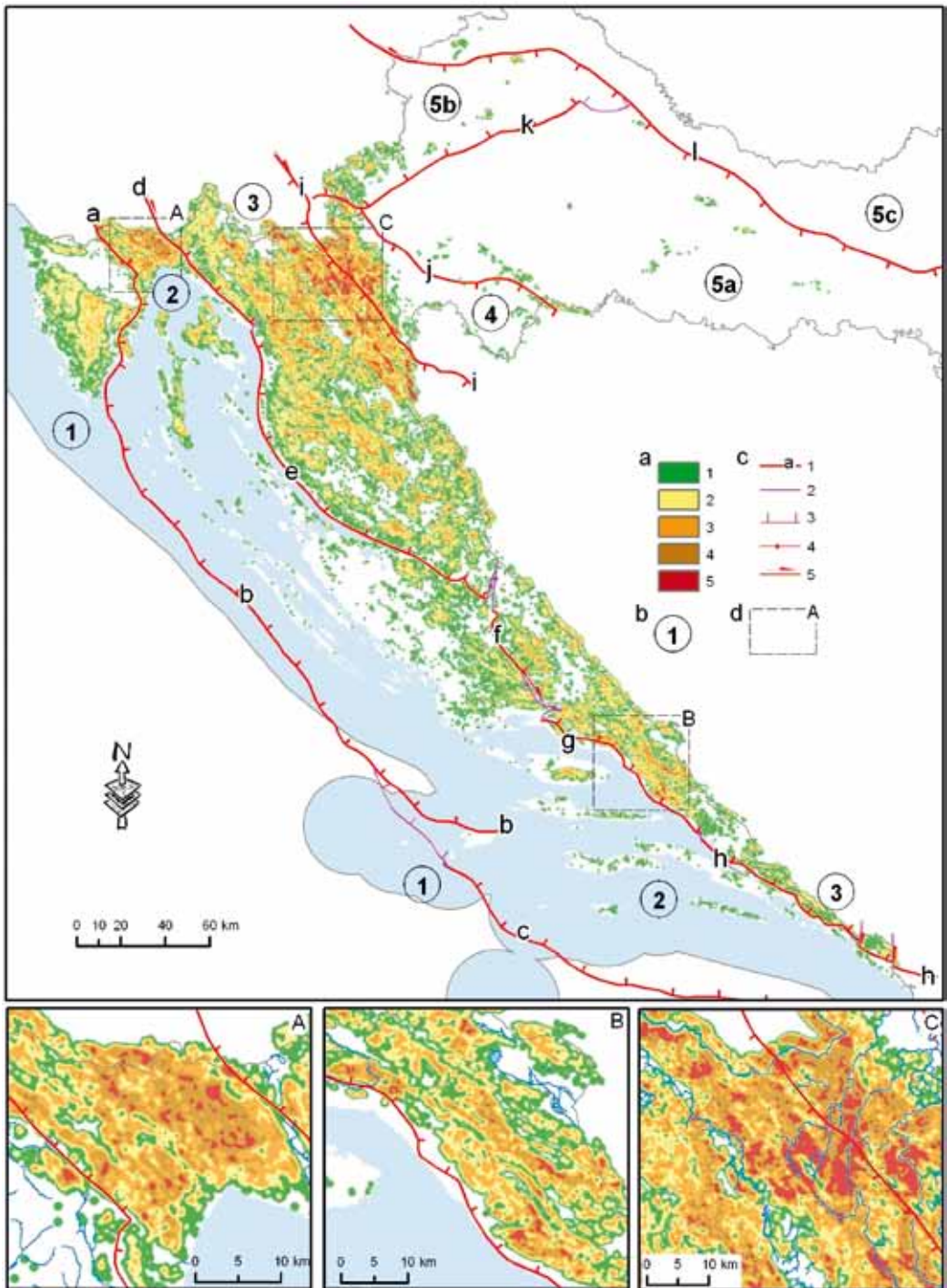
(20.862 ponikve na 1.734,5 km²) (tab. 2). S druge strane, promatramo li razvoj ponikava unutar iste litostratigrafske cjeline šireg područja, dolazimo do drugačijih rezultata. Tako primjerice postoji velika razlika u gustoći ponikava unutar tercijarnih karbonatnih breča, od neznatne gustoće na dnu zavale Ličkog polja i primorske padine Velebita do značajne gustoće, i do 80 pon/km², u udolini Kosinjskog Bakovca. Opisane razlike jasno se vide na primjeru gustoće ponikava u okolici Plitvičkih jezera (sl. 7), od oštrog prijelaza iz kategorija vrlo velike gustoće ponikava na rudistnim vapnencima senonske starosti prema neznatnoj gustoći na dolomitima gornjeg trijasa i maloj gustoći na dolomitno-vapnenačkim sedimentima lijasa do velikih razlika unutar vapnenačkih naslaga gornjokredne starosti.

Gustoća ponikava i recentni strukturni sklop

Analiza gustoće ponikava prema osnovnome recentnom strukturnom sklopu (sl. 8) (Prelogović i dr., 2003) pokazala je kako je unutar strukturne jedinice jadranske mikroploče najveća gustoća ponikava vezana uz Istarsku zaravan. Generalni pravac pružanja uzorka u užoj zoni reversnog rasjeda Trst – Učka prati pravac njegova pružanja. Uza spomenuti rasjed veže se i najveća gustoća ponikava unutar te strukturne jedinice (149,5 pon/km²). U središnjem dijelu Istarske zaravni zamjećuje se generalni pravac pružanja točkastog uzorka ponikva sjever – jug, što je i generalni pravac pružanja nastavka rasjeda Trst – Učka. Od navedenoga odstupa karbonatna zona sjeveroistočno od Buja s pružanjem istok – zapad.

U strukturnoj jedinici Adriatici po velikoj gustoći ponikava ističu se Ćićarija (154,6 pon/km²) i Kastavska zaravan (150,5 pon/km²) (sl. 8a). Ovdje se osobito izdvaja povezanost pružanja skupa točkastog uzorka ponikava i lokalnih struktura, što se u prvom redu očituje u praćenju povijanja struktura iz dinarskog pravca u pravac sjever – jug te očekivanom kontaktu vrijednosti velike i male gustoće ponikava uzduž graničnih rasjeda struktura. Kako je riječ o aktivnim rasjedima, i njihove su trase najčešće jasno izražene u reljefu. To se jasno uočava na rasjednom kontaktu između fragmenata zaravni Mune – Žejane – Brgud s gustoćom ponikava preko 100 pon/km² i strmaca Ćićarije s prosječnom gustoćom manjom od 10 pon/km². Nastavljanje strukturne zone Adriatike na kvarnerske otoke očituje se također u znatnoj vezi između porasta gustoće ponikava te pružanja fragmenata starijih pedimenata i denudacijskih razina zaravnivanja. Tako je na sjevernom dijelu Cresa zabilježena i najveća gustoća ponikava na jadranskim otocima, 99,3 pon/km². Slijedi sjevernodalmatinska zona s neznatnom do malom gustoćom ponikava. Izdvajaju se središnji dio Bukovice s gustoćom do 100 pon/km², sjevernodalmatinska zaravan na kojoj se javlja gustoća do 60 pon/km² te rubni dio SZ Dalmacije s povećanom gustoćom ponikava u nizovima udolina (sl. 8b). Kod južnodalmatinskih otoka po gustoći ponikava ističe se Brač s najvećom gustoćom od 97,6 pon/km².

Strukturna cjelina Dinarika zastupljena je na teritoriju Republike Hrvatske svojom cijelom širinom jedino u SZ dijelu strukture. Promatrajući gustoću ponikava uzdužnim profilom, jasno se uočava trend porasta gustoće od JZ prema SI, odnosno od graničnih reversnih rasjeda sa strukturom Adriatikom do graničnih reversnih rasjeda sa strukturom Supradinarikom. Usporedimo li pružanje uglavnom aktivnih reversnih rasjeda koji graniče lokalnim strukturama Dinarika s gustoćom ponikava, uočava se povećanje gustoće s udaljavanjem od aktivnih rasjeda, kao što je zabilježeno na Velebitu (Faivre, 1999) i Braču



Sl. 8. Gustoća ponikava i osnovne strukturne jedinice teritorija Republike Hrvatske: a) gustoća ponikava (pon/km²): 1) 1 – 10; 2) 10 – 30; 3) 30 – 60; 4) 60 – 100; 5) 100 – 200; b) regionalne strukturne jedinice (prema Prelogović i dr., 2003): 1) Jadranska mikroploča, 2) Adriatik, 3) Dinarik, 4) Supradinarik, 5) Panonski bazen, 5a) južni rubni dio, 5b) zapadni rubni dio, 5c) centralni dio; c) rasjedi (prema Prelogović i dr., 2003): 1) rasjedi granični regionalnim strukturnim jedinicama – a) Rasjed Trst-Učka, b) Rasjed Susak-Vis, c) Rasjed Vis-južni Jadran, d) Rasjed Ilirska Bistrica-Vinodol, e) Velebitski rasjed, f) Rasjed Knin-Sinj, g) Rasjed Mosor-Biokovo, h) Rasjed Ploče-Dubrovnik, i) Rasjed Ljubljana-Črnomelj-Slunj, j) Rasjed Črnomelj-Karlovac-Glina, k) Zagrebački rasjed, l) Periadriatik-Drava rasjed; 2) rasjedi granični lokalnim strukturnim jedinicama; 3) reversni rasjed; 4) rasjed bez oznake obilježja; 5) dionice rasjeda s prevladavajućom horizontalnom komponentom pomaka krila; d) izdvojena područja u krupnijemu mjerilu

Fig. 8. Doline density and basic structural units of the Croatian territory: a) doline density (dol/km²): 1) 1 – 10; 2) 10 – 30; 3) 30 – 60; 4) 60 – 100; 5) 100 – 200; b) Regional structure units (Prelogović et al., 2003) 1) Adriatic Microplate, 2) Adriatic, 3) Dinaric, 4) Supradinaric, 5) Pannonian basin 5a) southern marginal part, 5b) western marginal part, 5c) central part; c) faults (Prelogović et al. 2003), 1) faults that delimit the regional structural units a) Trst-Učka Fault, b) Susak-Vis Fault, c) Vis-južni Jadran Fault, d) Ilirska Bistrica-Vinodol Fault, e) Velebit Fault, f) Knin-Sinj Fault, g) Mosor-Biokovo Fault, h) Ploče-Dubrovnik Fault, i) Ljubljana-Črnomelj-Slunj Fault, j) Črnomelj-Karlovac-Glina Fault, k) Zagreb Fault, l) Periadriatik-Drava Fault; 2) faults that delimit the local structural units; 3) reverse fault; 4) fault without defined character; 5) faults with horizontal component of tectonic movement; d) separate areas on a larger scale

(Faivre i Pahernik, 2007). Tako su najveće vrijednosti gustoće ponikava vezane uza središnje dijelove struktura. Unutar strukturne jedinice Dinarika izračunata je i najveća srednja gustoća ponikava (odnos broja ponikava i površine strukture unutar RH) od 18,6 pon/km².

Reversni rasjed Črnomelj – Slunj koji razdvaja strukture Dinarika i Supradinarika prolazi područjem s najvećom gustoćom ponikava (sl. 4c). Razlog velike gustoće ponikava valja tražiti u činjenici da su posrijedi fragmenti jedne starije denudacijske razine zaravnavanja. Promatrajući smjer pružanja izolinija gustoće pojave i pružanje aktivnih rasjednih zona, i ovdje se uočava njihova generalna podudarnost. Posebice se to odnosi na dijelove trase rasjeda s povijanjem iz pravca pružanja SZ – JI u pravac SSZ – JJI i dalje ponovo u pravac SZ – JI kao posljedica retrogradne rotacije struktura izazvane promjenom u smjeru globalnog stresa (Prelogović i dr., 2003). Unutar struktura Panonskog bazena pojava ponikava vezana je uz manje zone karbonatnih stijena na površini i blizu nje, gdje u području Žumberka dosežu najveću gustoću i do 96 pon/km².

Zaključak

Provedena analiza gustoće ponikava na teritoriju Republike Hrvatske potvrdila je osnovne zaključke dosadašnjih regionalnih istraživanja odnosa gustoće pojave i osnovnih geomorfoloških i geoloških parametara njihova nastanka. Tako su razlike u gustoći ponikava odraz velikog broja, uglavnom međusobno zavisnih, čimbenika. Oni direktno utječu na mikrolokaciju samih ponikava, odnosno indirektno na njihov globalni razvoj u prostoru. Osnovni proces geneze ponikava jest korozija, čiji je intenzitet izrazito selektivan. To zavisi prije svega od litološkog sastava te stupnja tektonske oštećenosti naslaga. Kao posljedica javlja se veća ili manja rezistentnost naslaga, što u konačnici dovodi i do različitosti u

Tab. 2. Broj i gustoća ponikava unutar regionalnih strukturnih jedinica i dominantnih genetskih tipova reljefa
 Tab. 2. The number and density of dolines within the regional structural units and dominant genetic types of relief

	Broj ponikava	Površina* [km ²]	Pon/km ²
Jadranska mikroploča	20.921	2.503,6	8,4
Akumulacijski (kvartarni sedimenti)	17	130,1	0,1
Krški	20.311	1.842,7	11,0
Ostalo	593	530,8	1,1
Adriatik	48.393	9.392,4	5,2
Akumulacijski (kvartarni sedimenti)	106	421,8	0,3
Fluviokrški	31	59,9	0,5
Krški	47.347	8.239,6	5,7
Ostalo	909	671,1	1,4
Dinarik	269.800	14.524,9	18,6
Akumulacijski (kvartarni sedimenti)	3.088	1.026,2	3,0
Fluviokrški	16.551	1.172,3	14,1
Krški	235.781	10.994,2	21,4
Glacijalni i periglacijalni	11.744	844,4	13,9
Ostalo	2.636	487,9	5,4
Supradinarik	32.968	2.506,5	13,2
Akumulacijski (kvartarni sedimenti)	4	89,5	0,0
Fluviokrški	2.843	229,2	12,4
Krški	29.577	704,6	42,0
Ostalo	544	1.483,2	0,4
Panonski bazen zapadni rubni dio	3.737	3.917,0	1,0
Fluviokrški	1.437	273,1	5,3
Krški	1.860	264,5	7,0
Ostalo	440	3.379,4	0,1
Panonski bazen centralni dio	130	6.957,2	0,0
Panonski bazen južni rubni dio	757	16.752,2	0,0

* Podrazumijeva površinu kopnenog dijela strukture.

Izvori: strukturni sklop (Prelogović i dr., 2003.) i morfogenetski tipovi reljefa (Bognar i dr., 2012)

gustoći ponikava. U slučaju povoljne geološke podloge razvoj ponikava ograničen je prije svega nagibom padina. Manji nagibi uvjetuju izrazitu vertikalnu komponentu otjecanja padalinske vode i vode snježnice, što pogoduje oblikovanju većeg broja ponikava. Manje nagibe nalazimo i na starijim denudacijskim razinama zaravnavanja s velikom gustoćom ponikava kao posljedicom duljine izloženosti karbonata koroziji. S druge strane, porastom nagiba padina slabi i vertikalna komponenta otjecanja, a time i intenzitet korozije. Kao negativan čimbenik razvoja ponikava javljaju se zone pretpostavljene aktivnosti rasjeda.

Daljnja istraživanja potrebno je usmjeriti na uključivanje morfometrijskih parametara ponikava u analizu utjecaja geomorfoloških i geoloških čimbenika na njihov postanak i razvoj te na prikupljanje podataka o prostornom rasporedu ponikava za čitav prostor Dinarida.

ZAHVALA

Ovaj rad nastao je u okviru znanstvenih projekata Geomorfološko kartiranje Republike Hrvatske (119-0000000-1299) i Geomorfološka i geokološka istraživanja krša Republike Hrvatske (119-1191306-1305) koje je financiralo Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske.

LITERATURA

- Angel, J. C., Nelson, D. O., Panno, S. V., 2004: Comparison of a new GIS-based technique and a manual method for determining sinkhole density: An example from Illinois' sinkhole plain, *Journal of Cave and Karst Studies* 66 (1), 9-17.
- Applegate, P., 2003: Detection of sinkholes developed on shaly Ordovician limestones, Hamilton Country, Ohio, using digital topographic data: Dependence of topographic expression of sinkholes on scale, contour interval, and slope, *Journal of Cave and Karst Studies* 65 (2), 126-129.
- Bočić, N., 2009: *Geomorfološke značajke prostora Slunjske zaravni*, disertacija, Geografski odsjek PMF-a, Zagreb.
- Bognar, A., 1994: Neke od temeljnih značajki razvoja pedimenata u gorskoj zoni vanjskih Dinarida, *Hrvatski geografski glasnik* 56 (1), 21-31.
- Bognar, A., Faivre, S., Buzjak, N., Pahernik, M., Bočić, N., 2012: Recent Landform Evolution in the Dinaric and Pannonian Regions of Croatia, u: *Recent Landform Evolution* (ur. Lóczy, D., Stankoviansky, M., Kotarba, A.), Springer, Heidelberg, London, New York, 313-344.
- Brundson, C., 1995: Estimating probability surfaces for geographical point data: An adaptive kernel algorithm, *Computers and Geosciences* 21, 877-894.
- Buzjak, N., 2006: *Geomorfološke i speleomorfološke značajke Žumberačke gore i geokološko vrednovanje endokrškog reljefa*, disertacija, Geografski odsjek PMF-a, Zagreb.
- Denizman, C., 2003: Morphometric and spatial distribution parameters of karstic depressions, Lower Suwannee River Basin, Florida, *Journal of Cave and Karst Studies* 65 (1), 29-35.
- Faivre, S., 1992: The analysis of doline density on the north Velbit and Senjsko bilo, u: *Proceedings of the international symposium Geomorphology and sea and the meeting of the geomorphological commission of the Carpatho-Balkan countries* (ur. Bognar, A.), Mali Lošinj, September 22-26 1992, Faculty of the Natural Science and Mathematics, Department of Geography, Zagreb, 135-143.

- Faivre, S., 1999: *Landforms and tectonics of the Velebit mountain range (Outer Dinarides, Croatia)*, disertacija, Geografski odsjek PMF-a, Zagreb.
- Faivre, S., Reiffsteck, P., 1999: Spatial distribution of dolines as an indicator of recent deformations on the Velebit mountain range – Croatia, *Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement* 2, 129-142.
- Faivre, S., Reiffsteck, P., 2002: Rom doline distribution to tectonic movements. Example of the Velebit mountain range, Croatia, *Acta carsologica* 31 (3), 139-154.
- Faivre, S., Pahernik, M., 2007: Structural influences on the spatial distribution of dolines, Island of Brač, Croatia, *Zeitschrift für Geomorphologie* 51 (4), 487-503.
- Florea, L., 2005: Using state-wide GIS data to identify coincidence between sinkholes and geologic structure, *Journal of Cave and Karst Studies* 67 (2), 120-124.
- Ford, D. C., Williams, P., 2007: *Karst Hydrogeology and Geomorphology*, John Wiley & Sons.
- Gams, I., 2000: Doline morphogenetic processes from global and local viewpoints, *Acta Carsologica* 29 (2), 123-138.
- Hrvatski geološki institut, 2009a: *Geološka karte Republike Hrvatske 1 : 300.000*.
- Hrvatski geološki institut, 2009b: *Tumač geološke karte Republike Hrvatske 1 : 300.000*, Zagreb.
- Klein, V., 1976: Gustoća ponikava Ličko – Goranske regije, *Geografski glasnik* 38 (1), 357-377.
- Mihevc, A., 1998: Dolines, their morphology and origin. Case study: dolines from the Kras, west Slovenia (the Škocjan karst), u: *Fourth international conference on geomorphology – Italy 1997*, Suppl. Geogr. Fis. Dinam. Quat. III, (4), 69-74.
- Mihljević, D., 1994: Analysis of spatial characteristic in distribution of sink-holes, as an geomorphological indicator of recent deformations of geological structures, *Acta Geographica Croatica* 29, 29-36.
- Mihljević, D., 1995: Geomorfološke značajke gorskog hrpta Učke gorske skupine Čičarije i Istarskog pobrđa, disertacija, Geografski odsjek PMF-a, Zagreb.
- Mihljević, D., Prelogović, E., 1992: Structural-geomorphological characteristic of the mountain ranges Učka & Čičarija, u: *Proceedings of the international symposium Geomorphology and sea and The meeting of the geomorphological commission of the Carpatho-Balkan countries* (ur. Bognar, A.), Mali Lošinj, September 22-26 1992, Faculty of the Natural Science and Mathematics, Department of Geography, 13-24.
- Mitchell, A., 1999: *The ESRI Guide to GIS Analysis, Volume 1: Geographic Patterns & Relationships*, ESRI Press, Redlands.
- Orendorff, R. C., Weary, D. J., Laguey, K. M., 2000: Geographic information systems analysis of geologic controls on the distribution of dolines in the Ozarks of south-central Missouri, USA, *Acta Carsologica* 29 (2), 161-175.
- O'Sullivan, D., Unwin, D. J., 2003: *Geographic Information Analysis*, John Wiley & Sons.
- Pahernik, M., 1997: *Recentni krški procesi i njihov utjecaj na oblikovanje reljefa gorske skupine Velike Kapele*, magistarski rad, Geografski odsjek PMF-a, Zagreb.
- Pahernik, M., 2000: Prostorni raspored i gustoća ponikava SZ dijela Velike Kapele – rezultati računalne analize susjedstva, *Goadria* 5, 105-120.
- Pahernik, M., 2005: *Geomorfologija Gorskog kotara – primjena geografsko informacijskog sustava u istraživanju reljefa*, disertacija, Geografski odsjek PMF-a, Zagreb.
- Polšak, A., Juriša, M., Šparica, M., Šimunić, A., 1976: *Osnovna geološka karta 1 : 100 000 list Bihać*, SGZ, Beograd – IGI, Zagreb.
- Polšak, A., Crmko, J., Šimunić, A., Šimunić, A., Šparica, M., Juriša, M., 1978: *Tumač Osnovne geološke karte 1 : 100 000 za list Bihać*, SGZ, Beograd – IGI, Zagreb.
- Prelogović, E., Pribičević, B., Dragičević, I., Buljan, R., Kapelj, J., 2003: *Tektonska aktivnost i klasifikacija struktura pogodnih za naftno geološka istraživanja u prostoru centralnog Jadrana i Dinarida*, elaborat – Rudarsko geološko naftni fakultet, Zagreb.

- Sauro, U., 2003: Dolines and sinkholes: aspect of evolution and problems of classification, *Acta Carsologica* 32 (2), 41-52.
- Silverman, B. W., 1986: *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*, Chapman and Hall, New York.
- Telbisz, T., 2010: Morphology and GIS analysis of closed depressions in Sinjevina Mts. (Montenegro), *Karst Development: original papers* 1 (1), 41-47.
- 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), 5-22.
- Vincent, P. J., 1987: Spatial distribution of polygonal karst sinks, *Zeitschrift für Geomorphologie* NF31 (1), 65-72.
- Williams, P. W., 1972: The analysis of spatial characteristics of karst terrains, u: *Spatial Analysis in Geomorphology* (ur. Chorley, R. J), London, 136-163.

SUMMARY

Spatial Density of Dolines in the Croatian Territory

Mladen Pahernik

The analysis of doline density has shown a dot pattern of dolines regardless of the genetic types and morphometric characteristics of the dolines. Each mapped doline regardless of its perimeter and depth had the same weight factor in the total density. A total of 376,706 ($\pm 0.87\%$) dolines have been identified in the Croatian territory. 372,082 dolines, i.e. 98.8% of the total number of dolines have been registered in the area of the Dinarides, while 4,624 dolines (1.2%) have been registered outside the Dinarides. There are 3,249 dolines in the Žumberak area, 313 in the Banovina region (located on the slopes of Zrinska Gora), 283 in Papuk, 244 along the slopes of Varaždinske Toplice, 225 on Medvednica Mountain, 121 in the Ravna Gora area and 109 in the area of Psunj and Pakračka Gora.

Doline density per square kilometre has been calculated based on the dot pattern of doline spatial distribution, applying a simple kernel method. The highest spatial density is calculated at 281 dolines per square kilometre found in the area of Gorski Kotar, north of Crni Lug. Over 200 dolines per square kilometre are also found northeast of Plaško in the area of Janja Gora (257 dolines per square kilometre), east of Ogulin in the area of Bukovica (247 dolines per square kilometre), southeast of Primišalj (217 dolines per square kilometre), southeast of Ogulin (211 dolines per square kilometre) and east of Tounj (207 dolines per square kilometre).

Based on the calculated values and their distribution characteristics, the following six types of doline density have been identified: very low density (1 – 10 dolines per square kilometre), low density (10 – 30 dolines per square kilometre), medium density (30 – 60 dolines per square kilometre), high density (60 – 100 dolines per square kilometre), very high density (100 – 200 dolines per square kilometre) and extremely high density (over 200 dolines per square kilometre).

The analysis of spatial differences in doline density has revealed that certain connections exist between doline development and relief morphometric parameters as well as lithological and structural terrain features. Doline density depending on the hypsometric relief relations, slope exposition and slope inclination and a vertical relief dissection map were analyzed based on the correlation between doline density and relief morphometric parameters. The most significant connection between doline density and relief morphometric parameters was determined by slope inclination.

Considering the lithological characteristics of the layers, the greatest number of dolines was formed in the limestone and dolomites from the Early Cretaceous period (about 25 dolines per square kilometre). Somewhat lower doline density is found in the carbonates from the Jurassic period (about 20 dolines per square kilometre). Although it is difficult to determine the difference between doline density in the limestone and dolomites due to generalization of lithological characteristics, doline density in pure dolomites from the Late Triassic period (12 dolines per square kilometre) indicates that there is lower doline density in the dolomite layers. Considering the relation between doline density and position of the main structures, we noticed that doline density increases with the distance from the active fissures and decreases in active fissure zones.

Primljeno (Received): 22 - 02- 2012

Prihvaćeno (Accepted): 05 - 11- 2012

Dr. sc. **Mladen Pahernik**, docent
Hrvatsko vojno učilište „Petar Zrinski”
Ilica 256 b, Zagreb
mladen.pahernik@morh.hr