

# Geomorfološki značaj urušnih ponikava u okolici Markovog polja i Imotskog polja

---

Jurman, Laura Ana

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:609683>

Rights / Prava: [In copyright](#)/Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-21**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



Laura Ana Jurman

Geomorfološki značaj urušnih ponikava u okolici Markovog  
polja i Imotskog polja

Diplomski rad

Zagreb  
2021.



Laura Ana Jurman

Geomorfološki značaj urušnih ponikava u okolini Markovog  
polja i Imotskog polja

Diplomski rad

predan na ocjenu Geografskom odsjeku  
Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu  
radi stjecanja akademskog zvanja  
magistra struke znanosti o okolišu

Zagreb  
2021.

Ovaj je diplomski rad izrađen u sklopu diplomskog sveučilišnog studija *Znanosti o okolišu* na Geografskom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Nevena Bočića

A handwritten signature in blue ink, reading "Nevena Bočić".

22.2.2021.

## TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Zagrebu  
Prirodoslovno-matematički fakultet  
Geografski odsjek

Diplomski rad

Geomorfološki značaj urušnih ponikava u okolici Markovog polja i Imotskog polja

Laura Ana Jurman

Izvadak: Velike urušne ponikve su zatvorene krške depresije koje se ističu među okolnim depresijama zbog svojih iznimnih dimenzija i strmih, stjenovitih padina te nastaju podrivanjem podzemnih tokova duž tektonski nestabilnih zona. Na temelju digitalnog modela reljefa rezolucije  $5 \times 5$  m istražene su opće morfometrijske karakteristike reljefa Markovog polja u Lici i Imotskog polja te prostorna rasprostranjenost i karakteristike urušnih ponikvi na tim područjima. Cilj rada bio je odrediti odnose između morfometrijskih pokazatelja, litoloških i strukturnih značajki prostora te napraviti sintezu svih analiziranih podataka kako bi se razumio utjecaj reljefa i geološke građe na raspored velikih urušnih ponikva odabranih područja. Uočena je povezanost većih nagiba padina i veće vertikalne raščlanjenosti reljefa padina urušnih ponikava od okolnog reljefa. Iz odnosa volumena i površine ponikava mogu se podijeliti u tri grupe prema starosti; mlade, zrele i stare. Urušne se ponikve nalaze u rasjednim zonama, uz veće pukotine i na litološkim granicama.

70 stranica, 30 grafičkih priloga, 10 tablica, 116 bibliografskih referenci; izvornik na hrvatskom jeziku

Ključne riječi: urušne ponikve, udornice, morfometrija, krš, Sjeverni Velebit, Imotsko polje

Voditelj: izv. prof. dr. sc. Neven Bočić

Povjerenstvo: prof. dr. sc. Nenad Buzjak  
prof. dr. sc. Blanka Cvetko Tešović  
izv. prof. dr. sc. Marko Miliša

Tema prihvaćena: 10. 9. 2020.

Rad prihvaćen: 11. 2. 2021.

Rad je pohranjen u Središnjoj geografskoj knjižnici Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Marulićev trg 19, Zagreb, Hrvatska.

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zagreb  
Faculty of Science  
Department of Geography

Master Thesis

Geomorphological significance of collapse dolines in the vicinity of Markovo polje and  
Imotsko polje

Laura Ana Jurman

**Abstract:** Large-volume collapse dolines are enclosed karst depressions that stand out among the surrounding depressions due to their exceptional dimensions and steep, rocky slopes, and are a result of undermining by subsurface flow along tectonically unstable zones. The general morphometric characteristics of the relief of Markovo polje in Lika and Imotski polje, as well as the spatial distribution and characteristics of collapse dolines in these areas were investigated using a 5 x 5 m resolution digital elevation model. Research aim of this thesis was to determine the relationship between morphometric parameters, lithological and structural characteristics of the area and to make a synthesis of all the analysed parameters in order to understand the influence of relief and geological structure on the distribution of large collapse dolines in the selected areas. The connection between steeper slopes and greater vertical relief dissection of the collapse doline slopes from the surrounding relief was observed. From the relation between volume and surface area, collapse dolines can be divided into three groups according to age; young, mature and old. Collapse dolines are located in fault zones, near larger cracks and lithological boundaries.

70 pages, 30 figures, 10 tables, 116 references; original in Croatian

**Keywords:** collapse dolines, udornice, morphometry, karst, Sjeverni Velebit, Imotsko polje

**Supervisor:** Neven Bočić, PhD, Associate Professor

**Reviewers:** Nenad Buzjak, PhD, Full Professor  
Blanka Cvetko Tešović, PhD, Full Professor  
Marko Miliša, PhD, Associate Professor

**Thesis title accepted:** 10/09/2020

**Thesis accepted:** 11/02/2021

Thesis deposited in Central Geographic Library, Faculty of Science, University of Zagreb, Marulićev trg 19, Zagreb, Croatia.

## Sadržaj

1. Uvod.....	1
1.1. Krš .....	2
1.2. Ponikve .....	3
1.3. Urušne ponikve.....	5
2. Pregled dosadašnjih istraživanja.....	8
2.1. Ponikve i urušne ponikve .....	8
2.2. Sjeverni Velebit .....	10
2.3. Imotsko polje .....	11
3. Istraživano područje.....	15
3.1. Markovo polje .....	15
3.1.1. Geološki sastav i građa.....	16
3.1.2. Klimatska obilježja.....	17
3.2. Imotsko polje .....	20
3.2.1. Geološki sastav i građa.....	21
3.2.2. Klimatska obilježja.....	22
4. Metode rada i izvori podataka .....	25
4.1. Morfometrija.....	25
4.1.1. Opća .....	25
4.1.2. Specifična.....	26
5. Rezultati i rasprava .....	28
5.1. Markovo polje .....	28
5.1.1. Urušne ponikve .....	28
5.1.2. Prostorni raspored i gustoća ponikava .....	31
5.1.3. Geologija .....	31
5.1.4. Hipsometrija.....	34
5.1.5. Nagibi padina .....	35
5.1.6. Vertikalna raščlanjenost reljefa.....	36

5.2. Imotsko polje .....	41
5.2.1. Urušne ponikve .....	41
5.2.2. Prostorni raspored i gustoća ponikava .....	46
5.2.3. Geologija .....	48
5.2.4. Hipsometrija .....	50
5.2.5. Nagibi padina .....	51
5.2.6. Vertikalna raščlanjenost reljefa .....	53
6. Usporedba ponikava .....	57
7. Zaključak .....	60
8. Literatura i izvori .....	61

## 1. Uvod

Ponikve ili vrtače su najkarakterističniji površinski oblici u kršu te se smatraju dijagnostičkim oblicima krša (Ford i Williams, 2007). Posebni tip ponikava su urušne ponikve koje nastaju urušavanjem stropova iznad podzemnih šupljina duž tektonski nestabilnih zona. Urušne su ponikve na prostoru Hrvatske manje istražene.

Za izradu ovog rada odabrana su dva područja istraživanja sličnih geomorfoloških značajki. Područje istraživanja obuhvaća lokalitete u okolici Markovog polja u Lici te Imotskog polja.

Pri izradi rada koristile su se topografske i geološke karte te digitalni model reljefa.

Cilj ovog rada je:

- Izvršiti analizu općih morfometrijskih karakteristika reljefa (hipsometrija, nagib padina, vertikalna raščlanjenost).
- Istražiti i prikazati prostornu rasprostranjenost urušnih ponikvi Markovog i Imotskog polja.
- Istražiti specifične morfometrijske karakteristike istraživanih urušnih ponikava (površina, volumen, dubina).
- Provesti geomorfološku analizu urušnih ponikava, odrediti odnose između morfometrijskih pokazatelja, litoloških i strukturnih značajki prostora te napraviti sintezu svih analiziranih podataka kako bi se razumio utjecaj reljefa i geološke građe na raspored velikih urušnih ponikva odabranih područja.
- Usporediti urušne ponikve dva istraživana područja dinarskog krša Republike Hrvatske.

## 1.1. Krš

Krš je reljef koji se odlikuje specifičnim geomorfološkim oblicima i hidrografskim značajkama koji nastaju u kombinaciji visoko topivih stijena (vapnenac, gips ili mramor) i razvijene sekundarne (pukotinske) poroznost (Ford i Williams, 2007). U Hrvatskoj krški i fluviokrški reljef zauzimaju 43,7 % površine i razvija se na karbonatnim stijenama, vapnencu i dolomitu (Bognar i dr., 2012). Osnovna karakteristika krša je razvijen podzemni hidrografski sustav i podzemni reljefni oblici, a karakteriziraju ga specifični oblici kao što su špilje, jame, zatvorene depresije (ponikve, uvale, polja u kršu), rijeke ponornice, ponori i veliki izvori (Ford i Williams, 2007).

Za razvoj krša bitna su tri osnovna uvjeta: 1) prisutnost vodotopivih stijena, 2) razvijena pukotinska poroznost te 3) prisutnost vode, jednog od najbitnijih geomorfoloških agensa.

Razvoj reljefa i struktura ovisi o litološkoj podlozi, u Hrvatskoj karbonatne stijene čine 50 % podloge dok u svijetu samo 10%. Na prostoru Hrvatske značajni su vapnenci i dolomiti te mjestimično karbonatne breče i konglomerati. Vapnenci i dolomiti razlikuju se obzirom na mineralni sastav, mehanička i kemijska svojstva te nastanak i starost. U vapnencima najzastupljeniji mineral je kalcit ( $\text{CaCO}_3$ ), a može se sastojati i od Mg-kalcita, dolomita, aragonita, kvarca, glina i organske tvari. Dolomiti nastaju procesom dolomitizacije kada se minerali kalcita u vapnencu zamjene mineralom dolomitom ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) (Ford i Williams, 2007).

Na mjestima gdje ima topivih stijena s vrlo razvijenom (30–50 %) primarnom poroznosti, krš je vrlo slabo ili nije uopće razvijen, dok je najrazvijeniji krš uočen kod topivih stijena s zanemarivom primarnom (< 1 %), a razvijenom sekundarnom poroznosti. Primarna poroznost nastaje tokom geneze stijena, sekundarna ili pukotinska se javlja nakon što je stijena nastala uslijed tektonike i uslojavanja, a tercijska ili kanalska poroznost javlja se isključivo kod vapnenaca širenjem sekundarnih pukotina korozijom (Ford i Williams, 2007). U geološkoj prošlosti uslijed tektonike došlo je do raznih promjena koje su utjecale na sastav karbonatnih stijena, pomicanjem litosfernih ploča došlo je do savijanja, boranja i pucanja slojeva te tako i do nastanka sekundarnih pukotina. Sekundarne pukotine svojim položajem djelomično određuju raspored i kretanje podzemnih voda, a omogućavaju i poniranje vode koja pri tome otapa stijene (Bonacci i Roje-Bonacci, 2006).

Voda kao jedan od najbitnijih geomorfoloških agensa na topivim stijenama razvija krški i fluviokrški reljef. Do otapanja kalcita dolazi kad se ugljikov dioksid iz zraka otapa u vodi te nastaje karbonatna kiselina koja otapa kalcit te stvara udubine u vapnencu (Ford i Williams, 2007). Otapanje ovisi o parcijalnom tlaku CO<sub>2</sub>, klimatskim (količina i raspored oborina, temperatura), biogeografskim (vegetacija), pedološkim (debljina i prozračnost tla), reljefnim (nagib) i o svojstvima karbonatnih stijena određenog područja (Dreybrodt, 1988).

Intenzitet otapanje karbonatnih stijena najjači je u području epikrša, relativno duboki dio krša (debljine 15 do 30 m), neposredno ispod sloja tla koji je karakteriziran ekstremnim frakturiranjem (Vrbanac, 2013) koji je prekriven vlažnom zemljom koja je zapunila pukotine (Gams, 2000). Budući da karbonatne stijene ne zadržavaju površinsku vodu, za krš je karakteristično da se većina vode nalazi u podzemlju. Vodeni su tokovi prisutni na površini jedino ako se nalaze na vodonepropusnim stijenama, dok je voda koja se nalazi u podzemlju vrlo neravnomjerno raspoređena. Prisutnost vode u podzemlju te njena cirkulacija na mjestima gdje postoje sekundarne pukotine uzrokuje progresivno proširivanje šupljina i znatno povećava propusnost (Ford i Williams, 2007).

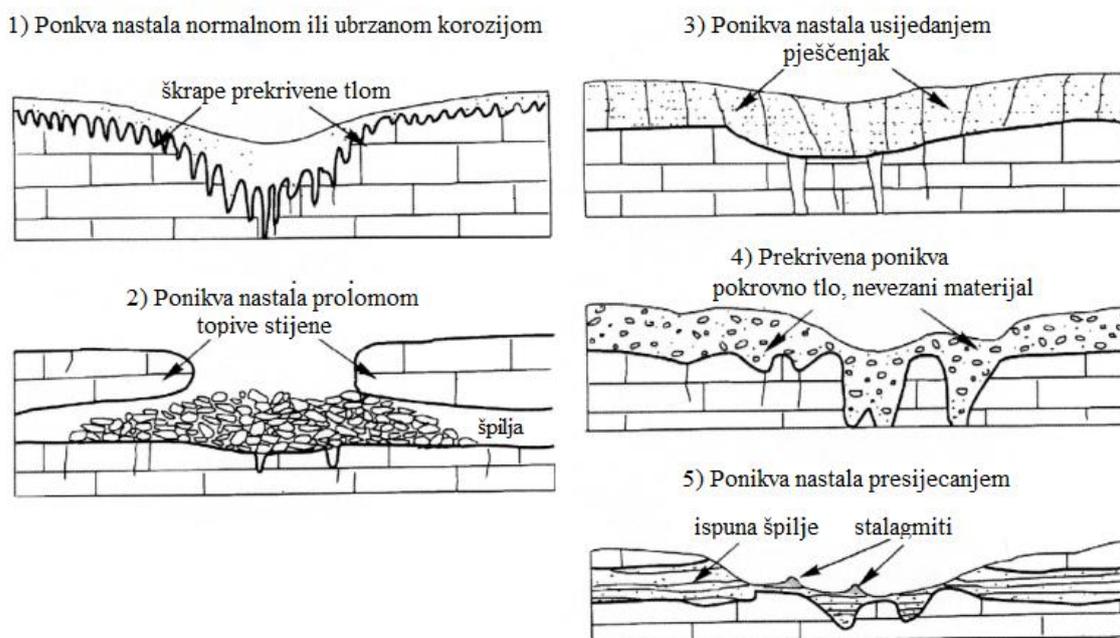
## 1.2. Ponikve

Ponikve ili vrtače (int. *doline*, US English *sinkhole*) su zatvorene depresije kružnog oblika. U njima se po pravilu ne zadržava voda, nego se njima voda centripetalno drenira u podzemlje kroz sustave pukotina, šupljina i špilja (Sauro, 2003; Vrbanac, 2013). Prema Rogliću (1974) promjera su od 10 do 500 m i dubine do 100 m. Ponikve su najtipičniji površinski krški oblik koji se smatra i dijagnostičkim oblikom krša, njihov prostorni raspored i gustoća jedan su od važnih pokazatelja stupnja okršenosti nekoga prostora (Ford i Williams, 2007).

Cvijić (1893) je među prvima opisao ponikve kao depresije cirkularnog ili eliptičnog ocrta te je započeo morfografsku klasifikaciju ponikava pa ih je prema presjeku podijelio na tanjuraste, zdjelaste, ljevkaste i bunaraste (Cvijić, 1893; Faivre, 1992). Cvijić je zagovarao teoriju korozijskog nastanka ponikava te je većina autora prihvatila njegovu definiciju i skicu prereza tipične ponikve na kojoj je ona temeljena, kao i ideju o vertikalnom odvodnjavanju u dnu ponikve (Kožar, 2020).

Različiti autori dijele i opisuju ponikve prema presjeku, veličini, nastanku, litologiji ili hidrološkoj funkciji. Dok sam oblik i veličina nisu značajna pri definiranju ponikva u kršu i

razlikovanju od ostalih depresija u različitim geomorfološkim okolišima, geneza ponikva se koristi kao glavni kriterij pri opisu različitih vrsta (Sauro, 2003). Sauro (2003) je opisao šest glavnih tipova ponikava prema nastanku, funkciji, veličini, geometrijskom obliku te litološkim i strukturnim značajkama reljefa (sl. 1):



Slika 1: Glavni tipovi ponikava prema Sauro (2003), preuzeto iz Bonacci i Roje-Bonacci (2006), prilagođeno

- 1) normalne, korozijske ponikve, odnosno ponikve nastale normalnom ili ubrzanom korozijom. Pri njihovom nastanku prevladava proces otapanja stijena, voda otječe u središnji dio koji postaje zona ubrzane korozije;
- 2) urušne ponikve, ponikve nastale prolomom, urušavanjem špiljskog stropa;
- 3) ponikve usijedanja, nastale otapanjem slojeva topivih karbonatnih stijena koje su smještene ispod vezanih, netopivih, propusnih stijena poput pješčenjaka. Rezultat su postupnog urušavanja, tj. slijeganja gornjeg sloja netopivih stijena i razvoja zatvorenih depresija;
- 4) prekrivene ponikve, nastale kao posljedica "upijanja" nevezanih klastičnih sedimenata koji prekriva ili djelomično zapunjuje kršku depresiju;
- 5) presijecane ponikve, nastale denudacijom, odstranjivanjem jamskih sedimenata iz bezstropne špilje;

6) ponikve nastale antropogenim utjecajem, nije prikazano na slici 1 (Sauro, 2003; Bonacci i Roje-Bonacci, 2006).

Svaki autor nudi neku svoju podjelu prema genezi, a zapravo čistih tipova ponikava u prirodi ima malo. Većina ponikava pojavljuje se kao kombinacija različitih tipova nastanka te se geneza ponikava ne može svesti na jedan proces. Nastanku ponikvi prethode različiti strukturno-geološki uvjeti i procesi, koji se međusobno isprepliću (Čar, 2001).

Bonacci i Roje-Bonacci (2006) na temelju svih podjela zaključuju da postoje dvije vrste mehanizma nastanka ponikvi. Za prvu su vrstu dominantni procesi prolamanja krovine koja se nalazi iznad šupljine u stijenskoj masi kada se za to stvore uvjeti te u trenutku nastanka mogu biti vrlo opasne. Kod druge vrste, udubine nastaju s površine, one su od početka vidljive i manje opasne od prve vrste. Najčešće se oba procesa zbivaju istodobno te sve druge klasifikacije mogu biti shvaćene kao podvrste.

### 1.3. Urušne ponikve

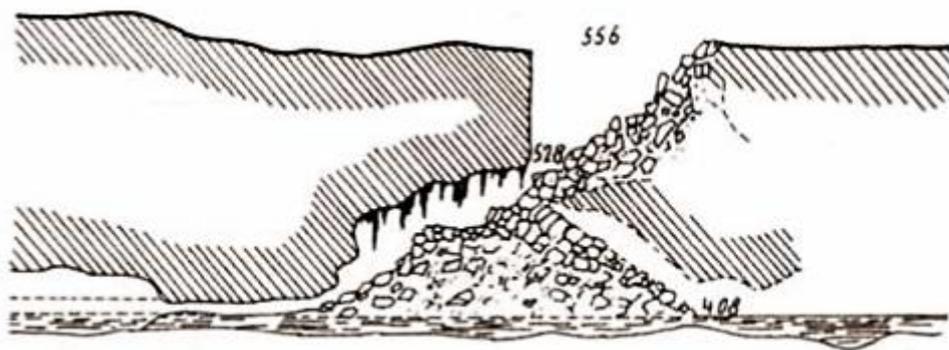
Urušne ponikve (slo. *udornice*) su krške depresije nastale urušavanjem stropova iznad podzemnih šupljina. U slovenskoj stručnoj literaturi naziv *udornica* obično se koristi za one zatvorene depresije koje se po veličini ističu među okolnim ponikvama ili imaju strme ili stjenovite padine (Stepišnik, 2010). Urušne ponikve, uz denudirane špilje te špiljske sustave, izravni su pokazatelji prošlih i recentnih hidroloških uvjeta područja s razvijenim podzemnim otjecanjem (Stepišnik, 2018).

Urušne ponikve su udubine različitih oblika i veličina, čija je geneza povezana s točkastim, vertikalnim odnašanjem stijena u podzemlje, bilo iznenadnim udarom, urušavanjem nad špiljskim prostorom ili postupnim mehaničkim ili korozijskim odnošenjem stijena iznad aktivnih špiljskih tunela. Zbog ograničene veličine špiljskih dvorana, urušavanje stropa iznad podzemnog prostora može prouzročiti samo stvaranje manjih urušnih ponikva (Stepišnik, 2010).

Podrijetlo urušnih ponikvi manjih dimenzija rezultat je urušavanja špiljskih dvorana koje se nalaze blizu površine. Manja urušavanja znaju imati i nastavak u špiljskim dvoranama u svojim nižim dijelovima. Ponikve većih dimenzija su rezultat dugoročnog podrivanja podzemnog toka duž tektonski nestabilnih zona (Stepišnik, 2018). Velike urušne ponikve znaju imati i duplo veći volumen od najvećih špiljskih dvorana (Gabrovšek i Stepišnik,

2011), a njihovi volumeni nisu posljedica velikog volumena špiljskih dvorana koje su bile ispod njih, već dinamike i perioda podzemnog podrivanja površine (Stepišnik, 2018).

Najstarije objašnjenje nastanka urušnih ponikva ponudio je Cvijić (1893) koji jednostavno navodi da one nastaju iznenadnim urušavanjem stropa, od kad potječe i naziv urušne ponikve (sl. 2).



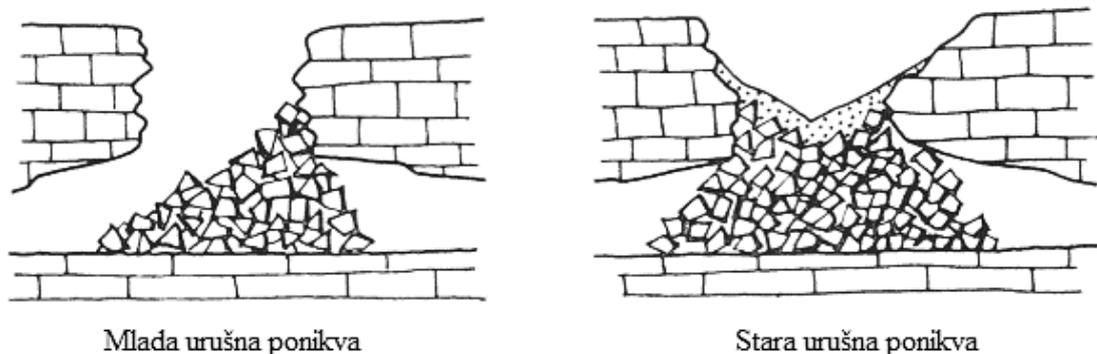
Slika 2: Urušna ponikva prema Cvijić (1893), preuzeto iz Stepišnik (2010)

Ako do urušavanja dolazi u samim krškim stijenama pokrivenim nevezanim materijalima, ponikve se nazivaju urušnim u strogom značenju te riječi. Ako je urušavanje u sloju nekrških stijena koje leže nad krškim stijenama, Williams (2004) tu vrstu urušnih ponikva naziva *caprock collapse dolines*, a kad je urušavanje unutar sloja pokrovnog, nevezanog materijala, Williams (2004) takve urušne ponikve klasificira kao *dropout dolines*. U oba slučaja urušavanju prethodi otapanje krških stijena i oblikovanje pukotina kroz koje otopljeni i korodirani materijal bude odnesen. Stvaranje urušnih ponikvi općenito je vezano s postojanjem špiljskog sustava ispod njih (Williams, 2004; Bonacci i Roje-Bonacci, 2006).

Za razliku od korozivskih ponikva gdje je za razvoj male ponikve potrebno do petnaest tisuća godina, a za veće i do stotinu tisuća godina (Williams, 2004), urušne ponikve pojavljuju se naglo, gotovo trenutačnim spuštanjem površine terena (Bonacci i Roje-Bonacci, 2006).

Šušteršič (2000) bavi se pitanjem jesu li urušne ponikve nastale samo urušavanjem te smatra da uvijek postoji istodobno djelovanje više mehanizama, s tim da je u nekom razdoblju razvoja ponikve pojedini mehanizam prevladavajući. Nastanak urušne ponikve prema Šušteršiču (2000) sastoji se od tri osnovna procesa: 1) nastanak šupljine, tj. stvaranje tzv. negativne mase; 2) nastanak ponikve; 3) oblikovanje njene geometrije. Tijekom prve faze procesa dolazi do odnošenja materijala, najprije iz pukotine, a poslije odlomljenoga sa svoda, nastanka prostrane krške podzemne kaverne i približavanja njenog svoda površini terena.

Urušna ponikva nastaje urušavanjem krovine, zbog čega nastaje otvor na površini. Proces se dalje nastavlja ublažavanjem pokosa i postupnim raspadanjem zbog denudacije (Bonacci i Roje-Bonacci, 2006).



Slika 3: Mlada i stara urušna ponikva, preuzeto iz Jennings (1975), prilagođeno

Jennings (1975) navodi kako su urušne ponikve u početku različitih oblika zbog različite površine i debljine krovine koja se uruši. Postoji jako veliki spektar omjera dubine i prosječnog promjera ponikvi, zato što od trenutka urušavanja, stijenke otvora ponikve mijenjaju svoj nagib dok ne dosegnu uravnotežen nagib padine te postanu tzv. stara urušna ponikva (sl. 3).

Do prije stotinjak godina nastanak urušnih ponikvi bio je prirodan proces, dok je u posljednje vrijeme dominantni uzročnik urušavanja antropogeni utjecaj, pogotovo crpljenje vode iz krških vodonosnika i veliki građevinski radovi (Bonacci i Roje-Bonacci, 2006).

## 2. Pregled dosadašnjih istraživanja

### 2.1. Ponikve i urušne ponikve

Na prostoru Hrvatske prostorni raspored i gustoću ponikava istražuju mnogi znanstvenici, s naglaskom na normalne ili korozijske ponikve, dok su urušne ponikve slabo istražene. Analizu prostorne gustoće ponikava za područje cijele Republike Hrvatske izradio je Pahernik (2012).

Na području Učke i Ćićarije prostorni raspored ponikva istražuje Mihljević (1995), Faivre (1992) na Sjevernom Velebitu i Senjskom bilu, Faivre i Reiffsteck (1999, 2002) na području Velebita, Pahernik (2000) na području Velike Kapele, Buzjak (2006) na području Žumberka i Samoborskoga gorja, Zdilar (2007, 2015) na području zavale Imotskog polja i podgorja Biokova, Faivre i Pahernik (2007) na otoku Braču, Bočić i dr. (2010) na području Slunjske zaravni, Bočić i Pahernik (2011) na području Biokova, Maršić (2011) na području Imotskog polja, Marković i dr. (2016) na području južnog Velebita te Kožar (2020) na području NP Plitvička jezera.

Buzjak (2000) na primjeru špilje na Žumberku i jame na otoku Cresu proučava procese urušavanja i usijedanja pri nastanku urušnih ponikvi. Autor primjećuje da je stanjivanje stropa podzemne šupljine ispod urušne ponikve ubrzano korozijom na dnu ponikve te da urušavanja nema kod debljih i stabilnijih stijena. Buzjak naglašava bitan utjecaj promjene razine podzemne vode i neotektonike u konačnom propadanju špiljskih stropova koji dovode do razvoja urušnih ponikvi.

Buzjak i dr. (2011) istražuju florističke, mikroklimatske i geomorfološke značajke urušne ponikve Japage na zapadnom Žumberku.

Na prostoru Dinarida urušne ponikve najviše je istraživao Stepišnik koji 2010. objavljuje knjigu „Udornice v Sloveniji“ te u devet poglavlja iznosi osnovne činjenice o nastanku i razvoju urušnih ponikvi. Autor daje pregled domaće i svjetske literature koja se bavila njihovim nastankom. Kao jedan od najopsežnijih radova o urušnim ponikvama, Stepišnik donosi prikaz 332 velike urušne ponikve u sedam regija, daje njihove osnovne morfometrijske značajke i rasprostranjenost u prostoru (Radoš, 2012). Za svaku regiju dana je pregledna karta s ucrtanim ponikvama i njihov tablični prikaz, a za odabrane ponikve i geomorfološke karte na kojima su utvrđeni procesi na padinama i dna urušnih ponikvi te njihov geoelektrični profil.

Stepišnik se u kasnijim radovima posvećuje urušnim ponikvama određenog područja te piše o Japagama, urušnim ponikvama Kupres polja u BiH (Stepišnik, 2014) i o urušnim ponikvama zaravni Grabovice, BiH, lokalno zvane samogradi, kao indikatorima prošlog hidrološkog režima (Stepišnik i Grlj, 2018).

Santo i dr. (2011) daju detaljnu analizu urušnih ponikvi krškog terena središnjih i južnih Apenina. Prostor Apenina je poput Dinarida mladog orogenetskog postanka iz kasnog mezozoika, s neotektonskim aktivnostima. Identificirano je 15 područja s visokom koncentracijom urušnih ponikvi, sve skupa 220 ponikvi te su istražene njihove glavne geološke i geomorfološke značajke, što je polazna točka u identifikaciji područja sklonih urušavanju, bitnih pri prostornom planiranju.

Šušteršič (1983) razvio je matematički model nastanka urušne ponikve. Za određivanje veličine, starosti i oblika, a time i za objašnjenje stadija razvoja ponikvi navodi sljedeće parametre: 1) težište ponikve; 2) zapremnina ponikve; 3) nagib stijenki otvora ponikve; 4) kut stabilnosti urušenog materijala i 5) koeficijent koji opisuje učinkovitost odnošenja urušenog materijala (Bonacci i Roje-Bonacci, 2006).

Šušteršič (2000) bavi se procesima pri nastajanju i preoblikovanju urušnih ponikvi. U svom radu klasificira urušne ponikve Slovenije i procese u njima u pet najčešćih tipova. Uspoređujući svih pet tipova autor zaključuje da urušavanje stropa špilje ostaje presudan događaj u razvoju urušnih ponikvi. Krajnji rezultat razvoja urušnih ponikvi autor naziva *fantomska udornica*. Fantomska urušna ponikva nastaje denudacijom bočnih padina te je jedva primjetna depresija s dnom ispod razine nekadašnje špilje.

Za istraživanje dna ponikvi zatrpanih materijalom Stepišnik (2008) koristi metodu profiliranja geoelektričnom tomografijom (eng. *Electrical Resistivity Imaging*, ERI). Geoelektrični profili su često korišteni u geofizici za proučavanje struktura ispod zemlje i veliki su napredak u proučavanju krškog podzemlja. Geoelektrični profili napravljeni su pomoću uređaja za mjerenje otpora, koji pomoću sonde odašilje signale u podzemlje i mjeri otpor različitih stijena (Radoš, 2012).

Zadnjih godina geomorfolozi, geolozi i geofizičari traže nove metode proučavanja nastanka i razvoja urušnih ponikvi. Gabrovšek i Stepišnik (2011) razvijaju 2D model trošenja topivih stijena u freatičkoj zoni gdje su stijene s mnogo pukotina (zdrobljena zona) presijecane krškim provodnikom. Što je veća dodirna površina stijena s vodom, brže je uklanjanje stijena

iz zdrobljene zone, što je jedan od nužnih uvjeta za stvaranje velikih urušnih ponikva. Svojim modelom su dokazali da velike urušne ponikve mogu nastati za milijun godina.

Hiller i dr. (2014) nadograđuju prethodni model s trećom dimenzijom, potvrđuju ga te ukazuju da unutar krškog sustava može biti više lokacija gdje uvjeti omogućuju razvoj urušnih ponikvi. Kaufmann (2014) provodi geofizička istraživanja korozivskih i urušnih ponikvi temeljena na gravimetrijskim, električnim i geomagnetskim metodama. Romanov i dr. (2020) razvijaju konceptualni model razvoja krša kojim numerički pokazuju da je nastajanje urušnih ponikvi vrlo složena interakcija između procesa koji određuju razvoj krša i mehaničke stabilnosti vodonosnika u topljivoj stijeni.

## 2.2. Sjeverni Velebit

Prostor Sjevernog Velebita značajan je po svojim reljefnim znamenitostima. Najstariji poznati pregled općih geomorfoloških obilježja S. Velebita dao je Bauer (1934/35) koji naglašava utjecaj glacijacije na oblikovanje reljefa. Suvremeni prikaz geomorfologije ovog područja daje Faivre (1994). Pregled novijih spoznaja o geomorfološkim obilježjima reljefa Sjevernog Velebita daju Bočić i dr. (2012) te Bočić i Pahernik (2017) s naglaskom na glacijalni reljef. Opis geomorfoloških obilježja ovog područja objavljuje i Stepišnik (2018) s naglaskom na krški reljef, a Buzjak i dr. (2017) daju prikaz značaja georaznolikosti S. Velebita (Bočić i dr., 2019).

Prelogović (1989) detaljno analizira slijed i mehanizam tektonskih kretanja istražujući neotektonske pokrete Sjevernog Velebita. Pri lociranju rasjeda koristi se analizom gustoće i rasprostranjenosti ponikvi. Daljnja strukturno geomorfološka istraživanja Sjevernog Velebita provodi Faivre (1994, 1996) (Bočić i dr., 2019).

U svojoj disertaciji Perica (1998) se bavi problematikom geomorfologije krša Velebita te istražuje krš, okršavanje i krške oblike. Obzirom na to da većinu Velebita obilježava krški teren, posebno su značajni radovi koji dovode u vezu strukturu geomorfoloških značajki i prostorni raspored ponikva (Faivre i Reiffsteck, 1999, 2002). Faivre (1992) proučava prostorni raspored i gustoću ponikva (Bočić i dr., 2019).

Stroj (2010) proučava hidrogeološka obilježja Velebita te obrađuje povezanost podzemnih tokova sa speleogenezom i površinskim reljefom.

Bočić i dr. (2019) rade pregled geomorfoloških obilježja Sjevernog Velebita. Prethodno rađene analize analognim metodama zamijenjene su digitalnom analizom reljefa s naglaskom na morfometrijskim i morfogenetskim obilježjima područja. Poseban naglasak u radu stavljen je na područje Nacionalnog parka Sjeverni Velebit.

O Markovom polju kao nastavku Markovog ponora u Lipovom polju nema mnogo znanstvene literature, no urušne su ponikve Markovog polja na kratko spomenute u najnovijim radovima Stepišnika (2018) i Bočića i dr. (2019). Bočić i dr. (2019) su napravili preliminarnu morfometrijsku analizu četiri urušne ponikve te pretpostavljaju moguću povezanost geneze urušnih ponikvi s oscilacijom razine temeljnice u ponorskoj zoni rijeke Like u Lipovom polju, dok Stepišnik govori o međusobnom utjecaju podzemnih tokova i rasjeda na stvaranje urušnih ponikva.

Sjeverozapadno od Markovog polja nalazi se Krasno polje o čijim geomorfološkim obilježjima piše Stepišnik (2015).

O Lipovom polju na jugoistoku i o poplavama u polju pisao je Holjević (1997). O Markovom ponoru te njegovoj morfologiji i hidrogeologiji kao jedan od najznačajnijih ponora rijeke Like piše Božičević (1968).

Osim u geomorfološkom okviru, Markov ponor u Lipovom polju važan je za biospeleologiju 1999. i 2000. obavljena su speleološka istraživanja ponora (Bakšić, 2003), a sam ponor je i tipski lokalitet, speleološki objekt u kojem je prvi put pronađena, i na temelju uzorkovanih primjeraka opisana, nova svojta za znanost (Jalžić i dr., 2013), za endemsku vrstu jednakonošca (Bedek i dr., 2017).

### 2.3. Imotsko polje

Crveno i Modro jezero na sjeveroistočnom rubu Imotskog polja najznačajniji su geomorfološki oblici ovog područja. Krajem devetnaestog i početkom dvadesetog stoljeća Cvijić (1893), Grund (1903), Gavazzi (1903/04) i Daneš (1905) objavili su prve radove o Crvenom i Modrom jezeru. Cvijić (1893) daje prvu ozbiljnu pretpostavku o nastanku jezera urušavanjem špiljskih stropova (Andrić i Bonacci, 2014).

Cvijić (1926) prihvaća tezu o urušavanju kao načinu nastanka po principu „dubljenje pa rušenje“ i pretpostavlja kasnije dokazana podzemna gibanja vode u dubini Crvenog jezera (Bonacci, 2006).

Roglić (1938) provodi sustavna istraživanja geomorfologije šireg područja Imotskog polja, obrađuju ponikve oboda polja i u samom polju. U svom radu ukazuje da su oba jezera cilindrične ponikve te istodobno isključuje mogućnost da su oba jezera u prošlosti funkcionirala kao ponikve (Andrić i Bonacci, 2014).

Prihvatajući urušavanje kao način nastanka imotskih jezera, Kunaver (1959/60) predlaže intenzivnu seizmičku aktivnost šireg prostora Imotskog polja kao jedan od mogućih inicijatora urušavanja (Bonacci, 2006).

Petrik (1960) provodi brojna hidrološka mjerenja ovog područja. Vjeruje da je Crveno jezero najmlađa ponikva od deset značajnih ponikvi na širem području Imotskog. U sklopu hidrološkog istraživanja izračunao je površinu Crvenog jezera, izmjerio najviši i najniži vodostaj jezera te dao hipotezu o volumenu i nadmorskoj visini na kojoj se nalazi samo dno jezera. Petrik (1960) smatra kako Crveno i Modro jezero imaju različiti hidrološki režim te pretpostavlja da imotska jezera ne pripadaju istom vodonosniku kao i jezera na SZ polja te da nemaju veze s hidrološkim režimom Imotskog polja (Andrić i Bonacci, 2014).

Božićević (1971) zastupa novu tezu o Crvenom jezeru kao našoj najdubljoj jami, zatim Milanović (1981) odgovara radom u kojemu Modro i Crveno jezero smatra korozivnim ponikvama koje su nastale kemijskim otapanjem vapnenca vodom. O Crvenom i Modrom jezeru kao ponikvama čije je dno prekriveno vodenom površinom piše Bojanić i dr. (1981) dok ih je Božićević (1983) opisivao kao velike provalije (Bonacci 2006, Maršić, 2011).

Bahun (1991) smatra kako pitanje je li Crveno jezero ponikva ili jama nije problem u terminologiji već je problem sa stajališta geneze jezera te iznosi potpuno novu teoriju o nastanku ovih krških fenomena. Iznosi tezu o Crvenom i Modrom jezeru kao ostacima ponora koji su regulirali vodostaj paleojezera koje je postojala u kasnom miocenu sjeveroistočno od današnjeg Imotskog polja. Nakon presušivanja jezera, ponori su ostali bez vode pa su egzogenim utjecajem i bočnim urušavanjem pretvoreni u ogromne ponikve (Modro jezero) ili duboke jame (Crveno jezero). Stalna voda i njezine oscilacije u Crvenom jezeru kao i povremena plavljenja Modrog jezera rezultat su dinamike podzemnih krških voda (Bahun, 1991; Andrić i Bonacci, 2014).

Krajem stoljeća, 1998. godine, nakon višegodišnjih priprema i uz pomoć novih tehničkih pomagala provedena su nova istraživanja Crvenog jezera. Nakon ekspedicije objavljeni su znanstveni radovi: Crvenom jezeru izmjerena je dubina od 6 m ispod razine mora te je procijenjen volumen jezera i izmjerena je temperatura ispod termokline (Garašić, 2000,

2012). Objašnjene su manje oscilacije vodostaja Crvenog jezera naspram Modrog jezera (Kovačević, 1999). Izneseni su rezultati ronilačkog dijela istraživanja (Ozimec, 1999). Smatra se da je dokazana izravna veza s krškim vodonosnikom. Istom vodonosniku pripadaju Modro i Crveno jezero, a nepodudaranja pri punjenju i pražnjenju pripisuju siparskom materijalu koji je kod Modrog jezera zatrpalo kanale koji ga s istim spajaju (Bonacci i Roje-Bonacci, 2000; Maršić, 2011; Andrić i Bonacci, 2014). Ozimec (1999) i Cukrov (2006) istražuju biologiju jezera te daju pregled flore i faune.

Gams (2005) pronalazi razlog spuštanja dna Crvenog jezera u seizmičkim aktivnostima regije. Gams (2005) navodi kako je potres 1942. godine smanjio dubinu Modrog jezera i uzrokovao odlom stijena u Crvenom jezeru. Pretpostavlja da je dno Crvenog jezera prekriveno debelim slojem odlomljenog materijala (Andrić i Bonacci, 2014).

Crveno i Modro jezero nastavljaju biti predmet hidroloških i geomorfoloških istraživanja. Od 2009. do 2010. provedena su kontinuirana hidrološka mjerenja Modrog jezera te je zaključeno da se jezero napaja vodom iz krškog vodonosnika na sjeveroistočnom dijelu sliva, gdje su oborine mnogo veće od oborina u Imotskom (Bonacci i dr., 2014). Od 2013. do 2015. provedena su hidrološka mjerenja Crvenog jezera, u tom je razdoblju svaki sat mjeran vodostaj, temperatura vode i električna vodljivost te su rezultati uspoređeni s Modrim jezerom (Andrić i dr., 2013, 2017). U svibnju 2017. godine provedena je Speleoronilačka ekspedicija kada je ostvaren povijesni prvenstveni zaron do dna Crvenog jezera te su provedena opsežna znanstvena, prvenstveno ekološka i biološka istraživanja Crvenog jezera (Ozimec i dr., 2017).

U stranoj literaturi, Bogli (1980) i Williams (2004) opisuju Crveno jezero kao najdublju urušnu ponikvu sa stalnom vodenom površinom. Waltham i dr. (2005) navode Crveno i Modro jezero kao primjer posebne vrste urušnih ponikvi *tiankengs*, ogromnih urušnih ponikva, dubljih od 250 m, najčešće prisutnih u tropskim krajevima.

U svojim radovima Roglić (1938, 1954), Petrik (1960), Bojanić i dr. (1981), Slišković i Ivičić (2001) detaljnije obrađuju fizičko-geografsku, hidrološku i hidrogeološku problematiku Imotskog polja.

Analizom hidrogeološkog režima pojedinih skupina izvora i jezera Imotskog polja: Prološko blato s okolnim jezerima, izvorište Vrljike i Imotska jezera, Bojanić i dr. (1981) zaključuju da se svi prihranjuju iz karbonatnog područja sjeverno i sjeveroistočno od polja te da im je barem dio sliva zajednički. Međusobni odnosi, visinska razlika razine vode u pojedinim

jezerima te položaj i visinske kote izvora, ukazuju na vrlo složene hidrogeološke odnose. Oni su rezultat dobre okršenosti terena, različitog kapaciteta pukotina i kanala koji dovode i odvođe podzemno vodu iz jezera te razvoja privilegiranih podzemnih vodnih puteva.

Dragičević i dr. (1999) detaljno analiziraju recentnu tektoniku Imotskog polja te daju važne podatke o strukturnim odnosima na površini i u dubini. Čitavo područje polja obilježeno je snažnim sustavima rasjeda, a mnogi od njih su neotektonski i još uvijek aktivni.

Bonacci i Roje-Bonacci (2000) tokom monitoringa razine podzemnih voda Imotskog polja istražuju i jezera na području Lokvičića te ih opisuju kao estavele.

Geomorfologiju zavale Imotskog polja detaljno je obradio Zdilar u svom magistarskom i doktorskom radu te izdaje knjigu na tu tematiku (Zdilar, 1999, 2007, 2015). Autor razrađuje geomorfološku problematiku zavale Imotskog polja te provodi geokološko vrednovanje i morfostrukturnu regionalizaciju reljefa. U svojim radovima se posvetio i analizi ponikva na obodu polja i u polju.

Maršić (2011) za svoj diplomski rad provodi geomorfološku analizu ponikva šireg područja Imotskog polja te određuje tri morfološki različite grupe ponikva.

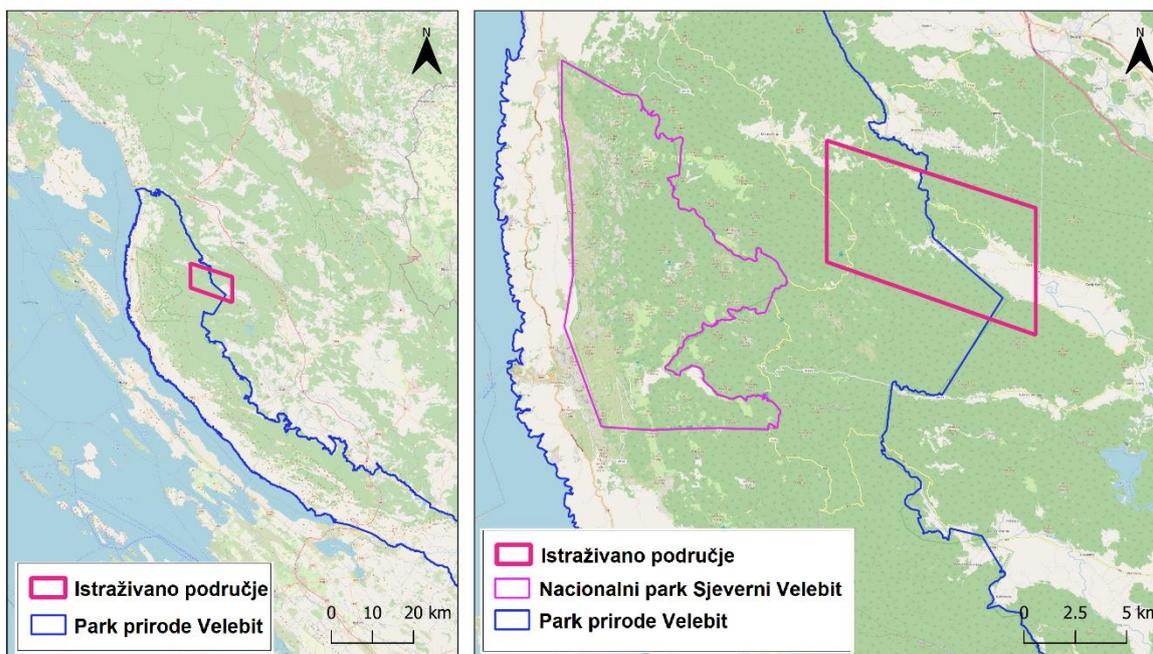
Skupina autora (Ivkić i dr., 2019) započinje paleolimnološko i geomorfološko istraživanje Prološkog blata na krajnjem sjeverozapadu polja.

### 3. Istraživano područje

#### 3.1. Markovo polje

Istraživano područje nalazi se u Ličko-senjskoj županiji, a u blizini se nalaze naselja Kuterevo na sjeveru, Lipovo Polje na jugoistoku te Krasno na sjeverozapadu. Dio područja nalazi se unutar Parka prirode Velebit te se zapadno od istraživanog područja nalazi Nacionalni park Sjeverni Velebit. Položaj istraživanog područja prikazan je na podlozi s OpenStreetMap (OSM), a vektori koji prikazuju zaštićena područja skinuti su s Bioportala (sl. 4).

Istraživano područje Markovog polja smješteno je između  $44^{\circ}44'$  i  $44^{\circ}49'$  sjeverne geografske širine i  $15^{\circ}05'$  i  $15^{\circ}13'$  istočne geografske dužine. Površina šireg istraživanog područja je  $62,13 \text{ km}^2$ .



Slika 4: Položaj istraživanog područja Markovo polje (OpenStreetMap contributors, 2020)

Geomorfološka regionalizacija Hrvatske temeljena je na morfostrukturnim, morfogenetskim, orografskim i litološkim obilježjima reljefa (Bognar, 2001).

Geomorfološki položaj istraživanog područja pripada:

megamakrogeomorfološkoj regiji 2. Dinarski gorski sustav;

makrogeomorfološkoj regiji 2.1. Gorska Hrvatska;

mezogeomorfološkoj regiji 2.1.7. Gorski hrbat – masiv Velebit;

subgeomorfološkoj regiji 2.1.7.2. Niz zavala Oltari – Krasno – Lipovo polje.

### 3.1.1. Geološki sastav i građa

Geološka građa istraživanog područja prikazana je na Osnovnoj geološkoj karti mjerila 1:100 000, list Otočac (Velić i dr., 1974) (sl. 13).

Jugozapadni dio istraživanog područja, jezgru tektonski dijelom reducirane antiklinale Krasno – Lipovo polje grade sedimenti donje jure (srednji lijas,  $J_1^3$ ). Na ovom području javljaju se pločasti, sivi i tamnosivi, izvanredno uslojeni vapnenci s povremenim ulošcima dolomitiziranih vapnenaca i dolomita. Krila antiklinale Krasno – Lipovo polje grade sivi i tamnosivi deblje uslojeni vapnenci sa slojevima dolomitiziranog vapnenca srednje jure (doger,  $J_2$ ). U vapnencima su razvijeni i dijagenetski dolomiti u obliku uložaka ili manjih leća. U kontinuitetu s srednjom jurom, gornjejurske naslage otkrivene su u krilima antiklinale (donji i gornji malm,  $J_3^{1,2}$  i  $J_3^{2,3}$ ). Naslage donjeg malma tvore različiti tipovi vapnenaca, dok je za sedimente gornjeg malma, u rasjedom razlomljenoj zoni karakterističan razvoj klipinskih vapnenaca (Sokač i dr., 1976).

Na istočnom dijelu istraživanog područja javljaju se naslage tercijarnih (E,OI) klastita. U ovim sedimentima prevladavaju gromadaste vapnenačke breče. Prostor Lipovog polja prekriven je holocenskim aluvijalnim naslagama. Naslage su izgrađene od valutaka, ulomaka i čestica starijih stijena koje su djelovanjem egzodinamskih faktora, u prvom redu leđa i vode, nošeni i taloženi u morfološki nižim dijelovima terena (Sokač i dr., 1976).

Istraživano područje nalazi se unutar jedne od tri glavnih rasjednih zona Sjevernog Velebita (zona Krasno – Lipovo polje), a obilježava ga antiklinala Jezera – Lipovo polje i rasjed Krasnog polja. Rasjed Krasno – Lipovo polje dinarske je orijentacije (SZ-JI) te se u reljefu ogleda nizom markantnih oblika vezanih za Krasno polje (dinarska orijentacija polja, strme padine Nadžak bila) i Lipovo polje (također dinarska orijentacija polja te ponorna zona rijeke Like) (Sokač i dr., 1976; Bočić i dr., 2019).

### 3.1.2. Klimatska obilježja

Klima je prosječno stanje atmosfere nad određenim mjestom u određenom razdoblju uzimajući u obzir prosječna i ekstremna odstupanja. Klima je skup svih klimatskih elemenata; temperatura, zračenje, tlak zraka, padaline, snježni pokrivač, vlaga zraka te naoblaka (Šegota i Filipčić, 1996). Svi ti elementi bitno utječu na oblikovanje reljefa aktivnim geomorfološkim procesima.

Za analizu temperature i padalina korišteni su podaci klimatološke postaje Gospić za vremensko razdoblje 1971.–2000 (DHMZ, 2020).

#### *Temperatura*

Najveći dio toplinske energije koja ulazi u atmosferske procese dolazi s površine Zemlje. Zagrijavanje atmosfere bitno ovisi o termičkim uvjetima na podlozi (Šegota i Filipčić, 1996).

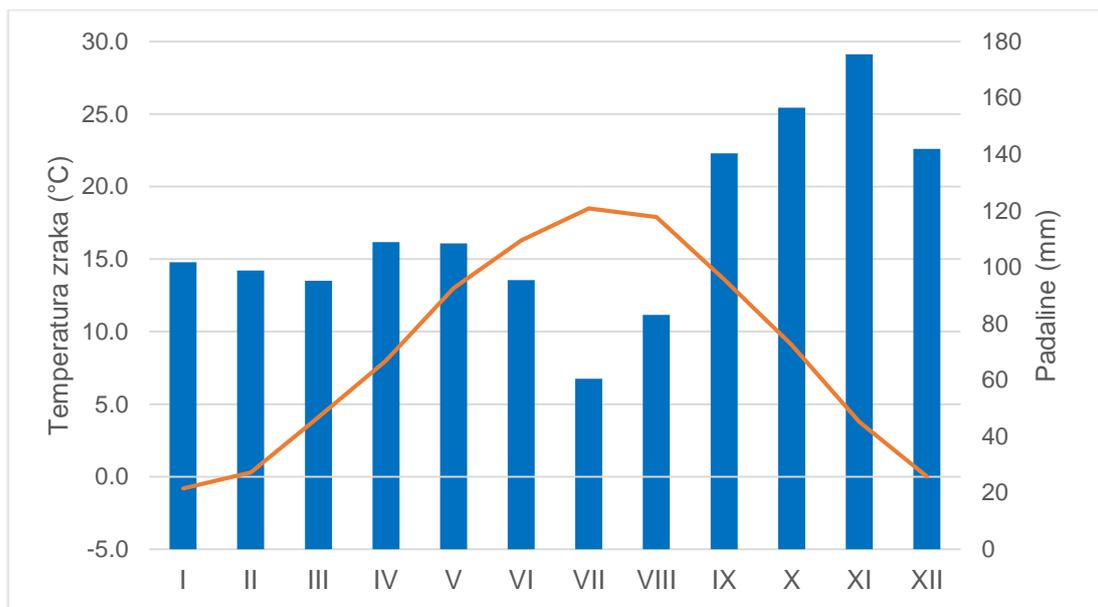
Za proučavanje klime istraživanog područja uzeti su klimatski podaci za Gospić (tab. 1, 2, 3).

Tablica 1: Temperature zraka u °C u Gospiću po mjesecima za razdoblje 1971.–2000. godine

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X.	XI	XII	Pr.
t	-0,8	0,3	4,1	8,0	13,0	16,3	18,5	17,9	13,6	9,1	3,8	0,0	8,7
T <sub>max</sub>	15,0	18,5	23,4	26,0	29,0	31,8	37,0	36,8	33,2	26,8	20,2	16,9	26,2
T <sub>min</sub>	-27,3	-26,1	-21,0	-7,1	-3,3	0,3	2,5	0,2	-4,9	-7,6	-18,3	-20,4	-11,1
t <sub>max</sub>	3,3	5,4	9,7	13,5	19,0	22,5	25,2	25,4	20,8	15,3	8,5	3,9	14,4
t <sub>min</sub>	-5,0	-4,2	-1,1	2,5	6,5	9,4	10,9	10,5	7,5	4,1	-0,4	-3,7	3,1

Izvor: DHMZ

U istraživanom razdoblju najtopliji mjesec je srpanj s prosječnom temperaturom od 18,5 °C kada je i izmjerena najviša temperatura na području od 37,0 °C, dok je u kolovozu izmjeren najviši prosječni maksimum od 25,4 °C. Najhladniji mjesec je siječanj s prosječnom temperaturom od -0,8 °C kada je izmjerena i apsolutno najniža temperatura od -27,3 °C te prosječni minimum koji iznosi -5 °C. Prosječna godišnja temperatura je 8,7 °C (sl. 5).



Slika 5: Godišnji hod temperature zraka i količine padalina u klimatološkoj postaji Gospić, 1971.–2000.

### *Padaline*

Padaline čine važan dio hidrološkog sustava, natapaju površinu kopna i formiraju površinske ili podzemne tokove i akumulacije sudjelujući tako u oblikovanju reljefa (Šegota i Filipčić, 1996).

Tablica 2: Padaline u mm u Gospiću po mjesecima za razdoblje 1971.–2000. godine

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
R	101,8	98,8	95,2	108,9	108,4	95,4	60,4	83,1	140,4	156,5	175,4	141,9
R <sub>max</sub>	199,2	241,6	184,9	181,8	239,6	289,5	140,6	160,2	376,3	505,9	382,2	390,7
R <sub>min</sub>	1,5	11	19,9	58,3	14,4	33,1	4,6	3,9	12,7	16,4	18,2	24,1

Izvor: DHMZ

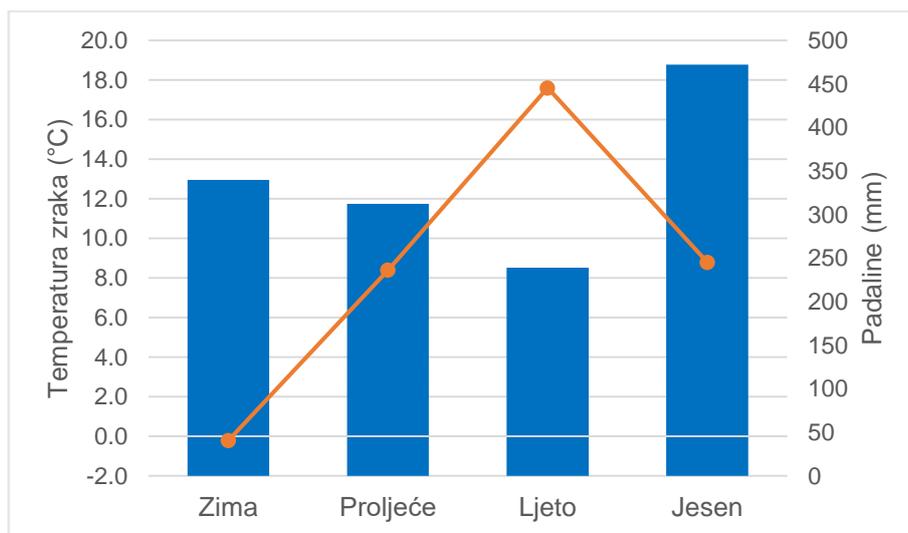
Mjesec s najvišom prosječnom količinom padalina je studeni kada je izmjereno 175,4 mm, a najviša količina padalina izmjerena je u listopadu (505,9 mm). Najsuši mjesec je srpanj s prosječno 60,4 mm, a apsolutni minimum padalina izmjeren je u siječnju te iznosi 1,5 mm (tab. 2).

Tablica 3: Temperature zraka u °C i količina padalina u mm u Gospiću po godišnjim dobima za razdoblje 1971.–2000. godine

	Zima	Proljeće	Ljeto	Jesen
t (°C)	-0,2	8,4	17,6	8,8
T <sub>max</sub> (°C)	18,5	29,0	37,0	33,2
T <sub>min</sub> (°C)	-27,3	-21,0	0,2	-18,3
R (mm)	340	312,4	238,9	472,3

Izvor: DHMZ

Prema podacima temperatura i padalina za godišnja doba (tab. 3), najtoplije doba je ljeto, a zatim slijede jesen te malo hladnije proljeće. U promatranom razdoblju prijelaz iz zime u ljeto prosječno je bio hladniji u odnosu na prijelaz iz ljeta u zimu. Godišnje doba s najviše padalina je jesen pa zima, a najsuše doba je ljeto (sl. 6).



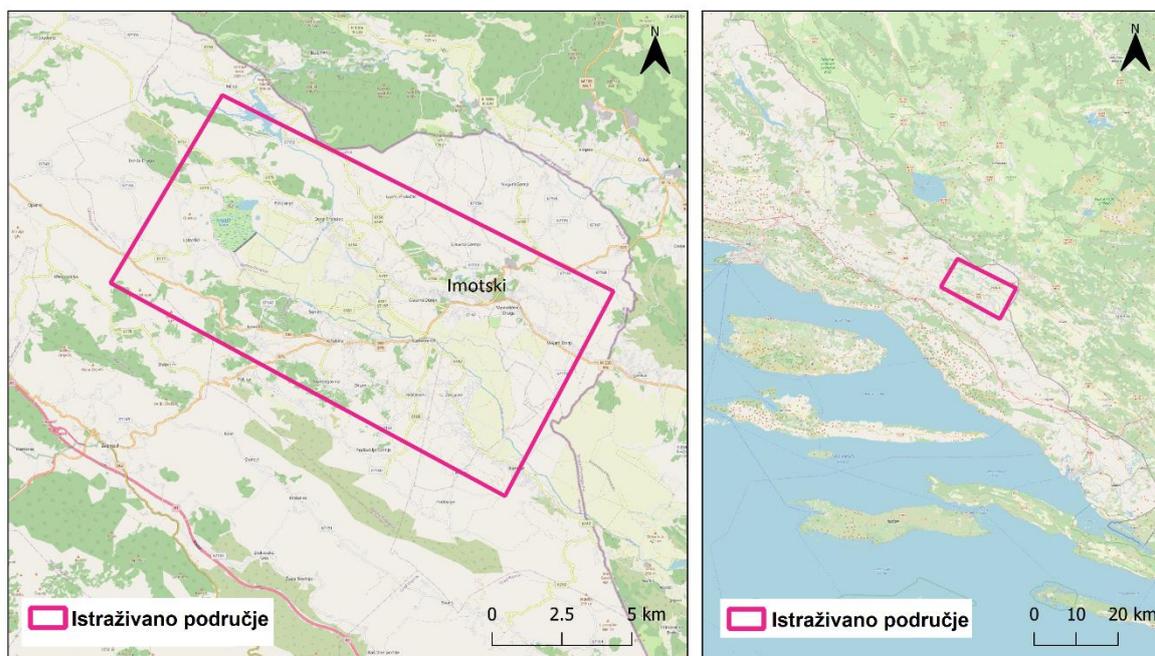
Slika 6: Klima dijagram po godišnjim dobima za Gospić u razdoblju 1971.–2000. godine

Istraživano područje karakterizira pravilna smjena godišnjih doba, prema Köppenovoj klimatskoj regionalizaciji Hrvatske (Šegota i Filipčić, 1996 i 2003), Gospić pripada *Cfb* tipu (umjereno topla vlažna klima s toplim ljetom). Istraživano područje nalazi se u rubnom području *Cfb* tipa i *D* tipa klime (snježno-šumske klime), tj. *Df* tipa klime (vlažne borealne klime) koji prevladava na područjima iznad 1 200 m nadmorske visine.

### 3.2. Imotsko polje

Istraživano područje Imotskog polja smješteno je između 43°23' i 43°31' sjeverne geografske širine i 17°03' i 17°17' istočne geografske dužine. Površina istraživanog područja je 128,55 km<sup>2</sup> te se nalazi u Splitsko-dalmatinskoj županiji (sl. 7).

Imotsko polje je zatvoreni tip polja izduženog oblika, proteže se pravcem sjeverozapad-jugoistok. Dužina polja je oko 33 km, a širina se kreće od 0,8 do 5,5 km. U okviru ovog rada istraživan je dio polja unutar državne granice Republike Hrvatske te je dužina polja u istraživanom području 16 km, a najveća širina 3 km. Zavala polja se nalazi na nadmorskoj visini od 248 do 290 m. Polje je blago nagnuto od sjeveroistoka prema jugozapadu i od sjeverozapada prema jugoistoku, što je jasno izraženo hidrografskom mrežom. Površina hrvatskog dijela Imotskog polja iznosi 46 km<sup>2</sup> (Bojanić i dr., 1981; Zdilar, 2015).



Slika 7: Položaj istraživanog područja Imotsko polje (OpenStreetMap contributors, 2020)

U geomorfološkom smislu prema geomorfološkoj regionalizaciji Hrvatske (Bognar, 2001) istraživano područje dio je:

- megamakrogeomorfološke regije 2. Dinarski gorski sustav;
- makrogeomorfološke regije 2.4. Centralna Dalmacija s arhipelagom;
- mezogeomorfološke regije 2.4.2. Brdsko-zaravansko-zavalsko područje Centralno dalmatinske zagore te
- subgeomorfološke regije 2.4.2.2. Zavala Imotskog polja s brdsko-zaravanskim okvirom.

### 3.2.1. Geološki sastav i građa

Geološka građa istraživanog područja prikazana je na Osnovnoj geološkoj karti mjerila 1:100 000, list Imotski (Raić i dr., 1977) (sl. 23). Uz rub polja razvijene su stijene kredne starosti (dolomiti i dolomitični vapnenci i vapnenci), dok u polju nalazimo klastične naslage koje najvjerojatnije u cjelini pripadaju kvartaru (glina, pijesak i šljunak). U širem području sjeverozapadnog dijela istraživanog područja nalaze se stijene paleogenske starosti (Raić i dr., 1978; Bojanić i dr.; 1981; Zdilar, 2015).

Južni rubni dio polja izgrađen je od dolomita, dolomitičnih vapnenaca i tamnosivih do crnih brečastih vapnenaca s prijelaza donje krede na gornju kredu ( $K_{1,2}$ ). Debljina ovih naslaga ne prelazi 360 m. Naslage gornje krede ( $K_2^{1,2}$ ) u području Lokvičića zastupljene su dobro uslojenim vapnencima s hondrodontama te mjestimičnim ulošcima dolomita. Pojedini slojevi sadržavaju brojne hondrodonte koji svojim ljušturama izgrađuju skoro cijelu stijenu. Debljina ove jedinice iznosi oko 400 m. Najmlađe gornjokredne naslage ( $K_2^{2,3}$ ) su vapnenci razvijeni u području D. Vinjani – Imotski – Proložac (sjeverni rub polja) i dalje u smjeru sjeverozapada. Svijetlosivi vapnenci su uglavnom slabo uslojeni i masivni, a bogati su rudistnom faunom. Ukupna debljina ovih vapnenaca je oko 700 m (Raić i dr., 1978; Bojanić i dr.; 1981; Zdilar, 2015).

Paleogenske naslage koje se pružaju od sjeverozapada prema sjeveroistoku predstavljene su alveolinsko-numulitnim vapnencima karakterističnim za donji i srednji eocen ( $E_{1,2}$ ). Vapnenci su svijetli, bjeličasti, leže transgresivno na gornjokrednim sedimentima te njihova debljina iznosi oko 420 m. Kvartarne naslage koje izgrađuju sjeverozapadno Imotsko polje sastavljene su od glina, lapora, pijesaka i šljunaka. Aluvijalne (al) naslage u najnižim dijelovima polja izgrađuju različiti pijesci, šljunci i ilovača izmiješana s crvenicom i humusom. Kvartarne naslage debele su i do 145 m (Raić i dr., 1978; Bojanić i dr.; 1981; Zdilar, 2015).

Imotsko polje sa svojim karbonatnim rubnim područjem predstavlja izuzetan krški fenomen. Kao zatvoreni tip polja s vlastitom hidrografskom mrežom ima specifične morfološke i hidrogeološke karakteristike koje su se očitovale raznovrsnim hidrogeološkim pojavama. Sjeverni rubni dio polja izgrađen je od okršenih i dobro propusnih vapnenaca u kojima su razvijene velike i duboke ponikve od kojih su neke stalna ili povremena jezera. Južni rubni dio polja dijelom je izgrađen od dolomita i dolomitičnih vapnenaca s dosta skromnim razvojem krških fenomena (Raić i dr., 1978; Bojanić i dr.; 1981; Zdilar, 2015).

### 3.2.2. Klimatska obilježja

#### Temperatura

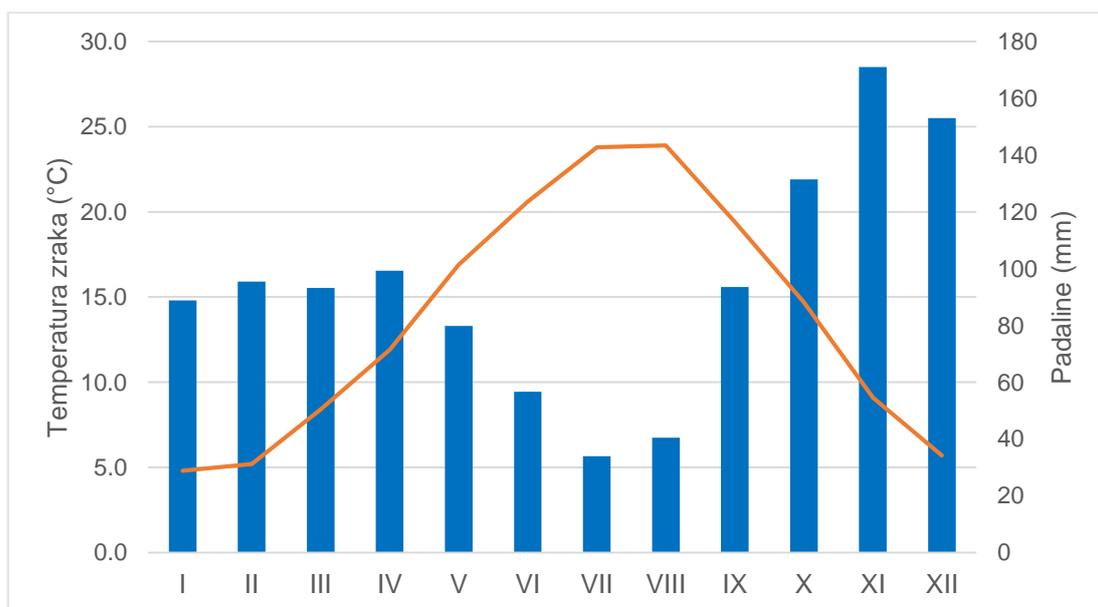
Za proučavanje klime istraživanog područja uzeti su klimatski podaci za Imotski 1981.–2001. (DHMZ, 2015).

Tablica 4: Temperature zraka u °C u Imotskom po mjesecima za razdoblje 1981.–2001. godine

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X.	XI	XII	Pr.
t	4,8	5,2	8,4	11,9	16,9	20,6	23,8	23,9	19,4	14,7	9,1	5,7	13,7
T <sub>max</sub>	18,0	23,1	28,0	28,6	31,0	35,2	39,2	39,7	37,0	31,2	24,0	21,0	29,7
T <sub>min</sub>	-11,0	-9,2	-9,0	-1,7	4,0	6,6	11,0	10,0	6,4	-0,4	-4,0	-8,7	-0,5

Izvor: DHMZ

Najtopliji mjesec je kolovoz s prosječnom temperaturom od 23,9 °C te je u istom mjesecu izmjerena i najviša maksimalna temperatura od 39,7 °C, a drugi najtopliji mjesec je srpanj s prosječnom temperaturom samo 0,1 °C manje tj. s 23,8 °C. Najhladniji mjesec je siječanj s prosječnom temperaturom od 4,8 °C, kada je izmjerena i apsolutna minimalna temperatura od -11,0 °C. Prosječna godišnja temperatura za razdoblje od 1981. do 2001. iznosi 13,7 °C (tab. 4). Prijelaz iz zime u ljeto prosječno je bio hladniji od prijelaza ljeta u zimu (sl. 8).



Slika 8: Godišnji hod temperature zraka i količine padalina u klimatološkoj postaji Imotski, 1981.–2001.

## Padaline

Tablica 5: Padaline u mm u Imotskom po mjesecima za razdoblje 1981.–2001. godine

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
R	88,8	95,4	93,2	99,3	79,8	56,6	33,9	40,4	93,5	131,5	171	153
R <sub>max</sub>	276	237	229	157	234	104	93	100	340	267	379	351
R <sub>min</sub>	1,4	0,7	7,1	17,1	22,8	10,2	0	0	0,5	12,6	41,3	13,4

Izvor: DHMZ

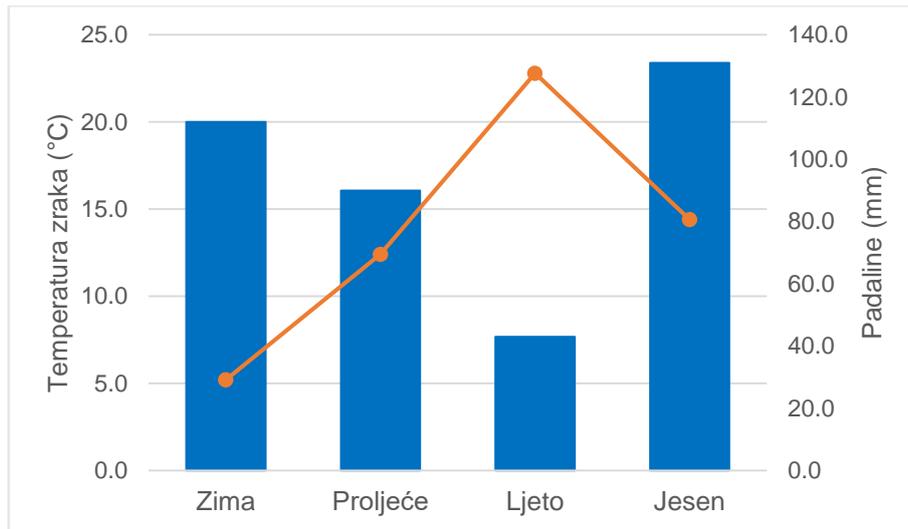
Najkišovitiji mjesec, s najvišom prosječnom količinom padalina je studeni s izmjerenih 171 mm koji je ujedno i mjesec s apsolutno najvišom izmjerenom količinom padalina, 379 mm. Najsuši mjesec je srpanj s prosječno 93 mm padalina, a padaline nisu zabilježene ni u srpnju ni kolovozu (tab. 5).

Tablica 6: Temperature zraka u °C i količina padalina u mm u Imotskom po godišnjim dobima za razdoblje 1981.–2001. godine

	Zima	Proljeće	Ljeto	Jesen
t (°C)	5,2	12,4	22,8	14,4
T <sub>max</sub> (°C)	23,1	31,0	39,7	31,2
T <sub>min</sub> (°C)	-11,0	-9,0	6,6	-4,0
R (mm)	112,0	90,0	43,0	131,0

Izvor: DHMZ

Prema podacima temperatura i padalina za godišnja doba (tab. 6), najtoplije doba je ljeto, a zatim slijede jesen te malo hladnije proljeće. Godišnje doba s najviše padalina je jesen pa zima, a najsuše doba je ljeto (sl. 9).



Slika 9: Klima dijagram po godišnjim dobima za Imotski u razdoblju 1981.–2001. godine

Istraživano područje karakterizira pravilna smjena godišnjih doba, obilježavaju ga vruća i suha ljeta te blage i kišovite zime. U prosjeku prijelaz iz ljeta u zimu je umjereniji od prijelaza iz zime u ljeto. Istraživano područje obilježava karakteristike mediteranske i kontinentalne klime, a prema Köppenovoj klimatskoj regionalizaciji Hrvatske, Imotski pripada *Cfa* tipu (umjereno topla vlažna klima s vrućim ljetom) koji obilježava široko zaleđe srednje Dalmacije (Šegota i Filipčić, 1996 i 2003).

## 4. Metode rada i izvori podataka

### 4.1. Morfometrija

#### 4.1.1. Opća

Morfometrija je skup metoda kojima se određuju različiti veličinski parametri određenog reljefa, odnosno provodi se kvantitativna analiza reljefa (Bočić i dr., 2016). Provedena je opća morfometrijska analiza istraživanog područja koja je obuhvaćala analizu visina, nagiba padina i vertikalne raščlanjenosti reljefa pomoću digitalnog modela reljefa.

Digitalni model reljefa (eng. *Digital elevation model*, DEM) predstavlja statističku reprezentaciju kontinuirane površine terena i temelji se na velikom broju x, y i z koordinata odabranih točaka u određenom koordinatnom sustavu (Pahernik, 2005). Kao izvor podataka korišten je DEM rezolucije 5 x 5 m, izrađen na temelju visinskih podataka Državne geodetske uprave iz baze prostornih podataka Geografskog odsjeka PMF-a u Zagrebu. Sve morfometrijske analize (opće i specifične) izrađene su korištenjem programskog paketa ArcGIS 10.8.

Hipsometrija predstavlja skup podataka i metoda kojima se analiziraju visinska obilježja reljefa te se temelji na analizi digitalnog modela reljefa. Hipsometrijska obilježja dobivena su grupiranjem visinskih podataka jediničnih ćelija DEM-a u visinske razrede raspona 100 m. Na temelju dobivenih podataka izračunati su udjeli i površine hipsometrijskih razreda. Provedena je analiza hipsometrijskih odnosa reljefa te je prema visinskim razredima prikazana na hipsometrijskoj karti.

Padine su osnovni element reljefa te je određivanje nagiba padina jedan od bitnih elemenata analize reljefa. U širim regionalnim okvirima (od deset do tisuću kilometara) nagibima padina se utvrđuje intenzitet endogenih procesa te su odlični geomorfološki markeri morfostrukturnih obilježja, a u lokalnim okvirima (do jednog kilometra) indikator su recentnih ili potencijalnih egzogenih procesa na padinama. Nagib je padina definirana vertikalnim kutom kojeg određena površina zatvara s horizontalnom ravninom (Lozić, 1996). Nagibi padina dobiveni su analizom DEM-a metodom najveće visinske razlike unutar susjedstva 3 x 3 kvadrata te su kategorizirani u šest standardnih kategorija nagiba koji se koriste u geomorfologiji (Lozić, 1996; Bočić i dr., 2019).

Vertikalna raščlanjenost reljefa je kvantitativna značajka reljefa koja pokazuje visinsku razliku najviše i najniže točke po jedinici površine. U lokalnim okvirima uvjetovana je

specifičnostima terena (litološki sastav i raspored, količina vode na terenu i dr.) i predstavlja parametar intenziteta razvitka egzogenih procesa. Na području s manjom vertikalnom raščlanjenosti reljefa dolazi do pojačane akumulacije, dok na području s većom vertikalnom raščlanjenosti veći je intenzitet erozije (Lozić, 1995). Podaci o vertikalnoj raščlanjenosti reljefa prikazuju energiju reljefa i odraz su najmlađih tektonskih pokreta (Zdilar, 2015). Vertikalna raščlanjenost mjerena je u jediničnim površinama  $1 \text{ km}^2$  tj. u krugovima polumjera 564 m sa središtem u svakoj jediničnoj ćeliji DEM-a. Izražena je u  $\text{m}/\text{km}^2$ , a podaci su svrstani u standardne geomorfološke kategorije (Bočić i dr., 2019). Za nagib padina i vertikalnu raščlanjenost korištena je ekstenzija *spatial analyst*.

#### 4.1.2. Specifična

Specifična morfometrijska analiza obuhvatila je analizu prostornog rasporeda i gustoće ponikvi te analizu urušnih ponikvi.

##### *Prostorni raspored i gustoća ponikava*

Prostorni položaj ponikava je vektoriziran na način da su se unosile točke koje predstavljaju dna ponikvi prema načelu jedna točka je jedna ponikva. Podaci o položaju ponikava prikupljeni su s listova topografskih karata mjerila 1:25 000 u izdanju Vojno-geografskog instituta Beograd. Nastala baza podataka korištena je za daljnju prostornu analizu rasporeda i gustoće točkastog uzorka (ponikava).

Tablica 7: Definirani razredi gustoće ponikva, preuzeto iz Pahernik (2012)

Raspon (pon/ $\text{km}^2$ )	Opis
1–10	Neznatna gustoća
10–30	Mala gustoća
30–60	Srednja gustoća
60–100	Velika gustoća
100–200	Vrlo velika gustoća

Za analizu gustoće ponikava primijenjena je jednostavna *kernel* metoda gustoća pojave uzorka koja predstavlja vrijednost broja pojave (dno ponikve) unutar kruga polumjera  $r$ , čije se središte nalazi na lokaciji  $t$ . Lokacije  $t$  definirane su ćelijama pravilne rasterske mreže unutar istraživanog područja, a za polumjer je određena vrijednost od 564 m što odgovara površini kruga  $1 \text{ km}^2$  (Pahernik, 2012). Dobivena gustoća izražena je kao broj ponikava po

km<sup>2</sup> te su rezultati razvrstani po razredima gustoće koje je predložio Pahernik (2012) (tab. 7).

### Urušne ponikve

Za određivanje oboda ponikva korištena je usporedba izolinija, poluautomatskih metoda *Fill* i *Cut Fill* i morfometrijskih obilježja terena.

Alat *Fill* unutar ekstenzije *Spatial Analyst* ispunjava sve nepravilnosti i depresije ulaznog rastera DEM-a do njihovog najnižeg ruba, a kao izlazni podatak dobiva se modificirani DEM, hidrološki pravilan raster. Pomoću alata *Cut Fill* izračunata je promjena volumena između ulaznog rastera i zapunjenog, hidrološki pravilnog rastera (sl. 10).



Slika 10: Princip rada alata *Fill* i *Cut Fill*

Zatim su se usporedbom nagiba terena, vertikalne raščlanjenosti reljefa i novo dobivenih izrezanih poligona depresija identificirale potencijalne urušne ponikve. Identificirane su depresije sa strmijim padinama ( $> 32^\circ$ ), većim promjerima ( $> 50$  m) te na području raščlanjenijeg reljefa ( $> 30$  m/km<sup>2</sup>). Osim morfometrijskih razlika, pri razlikovanju urušnih od korozijskih ponikvi uzeto je u obzir da urušne ponikve uglavnom imaju poluuglasti ili eliptični obod dok su korozijske ponikve kružnog oblika s blažim padinama (Santo i dr., 2011).

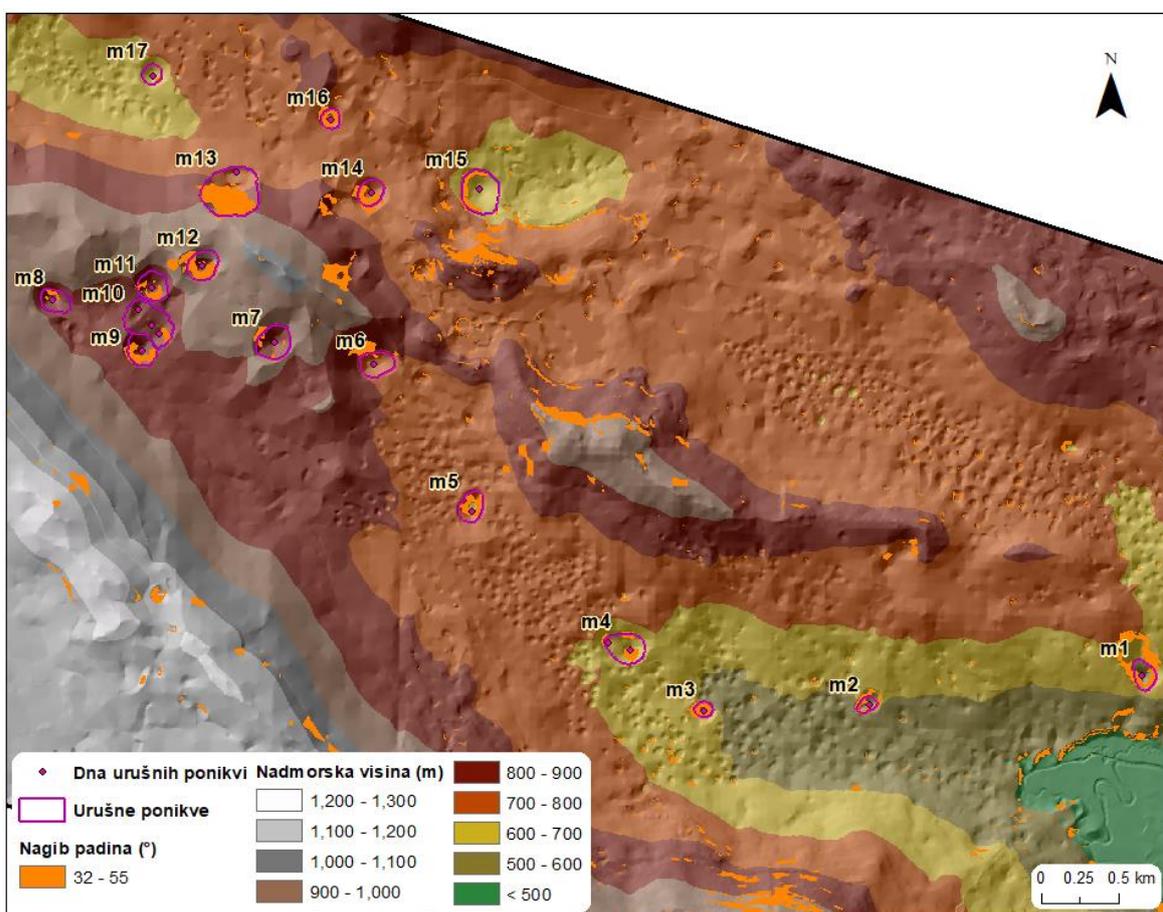
Na kraju izrađene su izohipse (slojnice) ekvidistance 10 m te na mjestima pretpostavljenih urušnih ponikva nacrtani poligoni uz najvišu zatvorenu izoliniju. Dubina ponikva je izračunata kao visinska razlika između dna ponikve i najviše zatvorene izolinije. Volumen je izračunat preko izrezanog *Cut Fill* rastera, a površina preko geometrije poligona. Identificirane su sve ponikve s topografske karte koje se nalaze unutar poligona te im je alatom *Extract Multi Values to Points* dodijeljena nadmorska visina, nagib padine, vertikalna raščlanjenost reljefa te područje gustoće ponikva, a toponimi su očitani s digitalne ortofoto karte pomoću programskog paketa QGIS 3.10.

## 5. Rezultati i rasprava

### 5.1. Markovo polje

#### 5.1.1. Urušne ponikve

Na istraživanom području uočeno je 17 većih i manjih urušnih ponikvi koje se pružaju u pravcu SZ–JI (sl. 11), što je isti pravac kojim se pruža i Krasansko – Lipovačka rasjedna zona (Faivre, 1992, Bočić i dr., 2019). U tablici 8 dane su nadmorske visine dna ponikvi, površina prema nacrtanom poligonu, volumen kalkuliran iz rastera, nagibi, vertikalna raščlanjenost reljefa te prostorna gustoća ponikvi na kojima se dna urušnih ponikvi nalaze. Podaci u tablici su posloženi prema površini, od najveće do najmanje.



Slika 11: Urušne ponikve Markovog polja

Površine ponikvi iznose od 9 100 do 97 600 m<sup>2</sup>, s prosječnom površinom od 32 500 m<sup>2</sup>, dok su im volumeni između 117 000 i 4 915 900 m<sup>3</sup>, a prosječni volumen iznosi 937 200 m<sup>3</sup>. Bočić i dr. (2019) su na temelju preliminarna morfometrijska analiza četiri odabrane urušne ponikve izračunali prosječnu površinu od oko 70 000 m<sup>2</sup> te prosječni volumen od oko 100 000 m<sup>3</sup>.

Ponikvi m13 se ne može izmjeriti volumen jer je previše denudirala. Dna urušnih ponikvi nalaze se na nadmorskim visinama od 554 do 874 m, u prosjeku na 729 m. Dubine urušnih ponikvi iznose od 22,5 do 73,8 m, a prosječna dubina 38,8 m.

Tablica 8: Dubine, površine i volumeni urušnih ponikva Markovog polja te morfometrijska obilježja točaka u kojima su zabilježena njihova dna

ID	Toponimi	Nadmorska visina dna (m)	Dubina (m)	Površina (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Područje nagiba (°)	Područje vertikalne raščlanjenosti (m/km <sup>2</sup> )	Područje gustoće ponikava (pon/km <sup>2</sup> )
m13	Greda	754,27	/	97 578,02	/	12,48	20,21	26,16
		844,38				10,64	16,66	31,20
m10	Rupe	839,24	29,69	62 853,40	1 632 936,44	16,33	24,40	48,39
		836,66				27,67	40,32	54,56
m15	Draga kraj Šmrečje	618,66	73,75	56 733,38	4 915 878,07	21,69	22,80	17,80
m4	Smijačev tavan	644,26	52,66	39 077,23	856 470,32	8,25	36,61	57,62
		607,07				3,46	35,91	42,10
m7	Jojina draga	852,00	48,69	38 860,50	938 644,08	12,81	25,01	12,72
m9	Rošnica	828,89	50,44	30 850,37	868 890,32	14,71	29,61	67,11
m12	Stružnica	873,64	44,31	30 666,67	719 888,11	4,66	28,81	9,33
m11	Štropi	833,24	48,09	29 854,09	713 622,30	10,24	26,69	18,51
m6	Jurišina draga	762,65	27,18	29 318,36	513 086,93	7,28	18,55	20,73
m5	Čaprljin tavan	692,72	45,25	25 303,43	802 954,14	44,03	55,24	65,35
m8	Rupe	847,01	33,10	23 625,35	388 922,32	1,15	26,32	29,50

m14	Cupinova draga	704,47	35,52	21 914,15	497 388,28	4,08	25,98	35,24
m1	Šopov dol	560,82	38,69	21 532,84	408 286,86	25,71	49,56	13,69
m17	Kuti	647,55	22,99	13 008,34	220 974,36	17,29	29,40	40,78
m16	Križići	729,44	29,62	13 004,37	263 896,56	1,11	29,52	72,05
m2	Kućišta	558,60	22,54	9 713,61	117 119,33	41,40	40,74	54,34
m3	Jošin atavan	554,27	35,37	9 135,87	198 730,17	19,02	50,52	80,11

Urušne se ponikve nalaze na prostorima manje gustoće ponikvi, gdje prosjek gustoće na kojoj se nalazi dno iznosi 40 pon/km<sup>2</sup>, a iznad 80 pon/km<sup>2</sup> nema pojave urušnih ponikvi.

Najmanji iznos vertikalne raščlanjenosti reljefa na kojem se nalazi dno urušne ponikve iznosi 16,66 m/km<sup>2</sup>, a najveći 55,24 m/km<sup>2</sup>, dok srednja vrijednost raščlanjenosti reljefa za dna iznosi 31,64 m/km<sup>2</sup>.

Dna ponikva nalaze se na nagibima od 1,11° do 44,03°, a prosječan nagib dna iznosi 15,20°, koji pripada u kategoriju jako nagnutih terena (12°–32°) gdje je općenito razvijen najveći broj urušnih ponikvi na istraživanom području. Nije uočen dominantan pravac izduženosti oboda ponikva.

Budući da urušne ponikve imaju uglavnom aktivne padine, znamo da je slijeganje ispod njih još uvijek prisutno (Stepišnik, 2018)

Prema nagibu terena, ponikve možemo podijeliti u dvije grupe. Prvu grupu čine ponikve čiji nagib padina je u rasponu 32°–45°, takve su ponikve m1, m2, m3, m4, m5, m9, m12, m13, m14, m15 i m16. Kod nekih od ovih ponikava postoje padine s nagibima iznad 45° (m1, m5 i m13). Drugu grupu prema nagibu padina čine ponikve s padinama čiji nagibi su 25°–32°, a u nju pripadaju m6, m7, m8, m10, m11 i m17. Tim je ponikvama dno zaravnjeno i prekriveno tlom dajući im zdjelast oblik.

Ponikva m2 prekrivena je trošinama stijena, ponikve prve skupine i ponikva m8 prekrivene su šumskim pokrovom što utječe na smanjenu eroziju tla, dok su ostale ponikve, iz druge skupine, prekrivene travnatom vegetacijom.

### 5.1.2. Prostorni raspored i gustoća ponikava

Površina istraživanog područja iznosi 62 km<sup>2</sup> te su na njemu utvrđene 1981 ponikve, što čini prostornu gustoću ponikva od 31,9 pon/km<sup>2</sup>. Izuzme li se područje na kojem nema razvijenih ponikava, na površini od 59 km<sup>2</sup> gustoća ponikava iznosi 33,6 pon/km<sup>2</sup>.

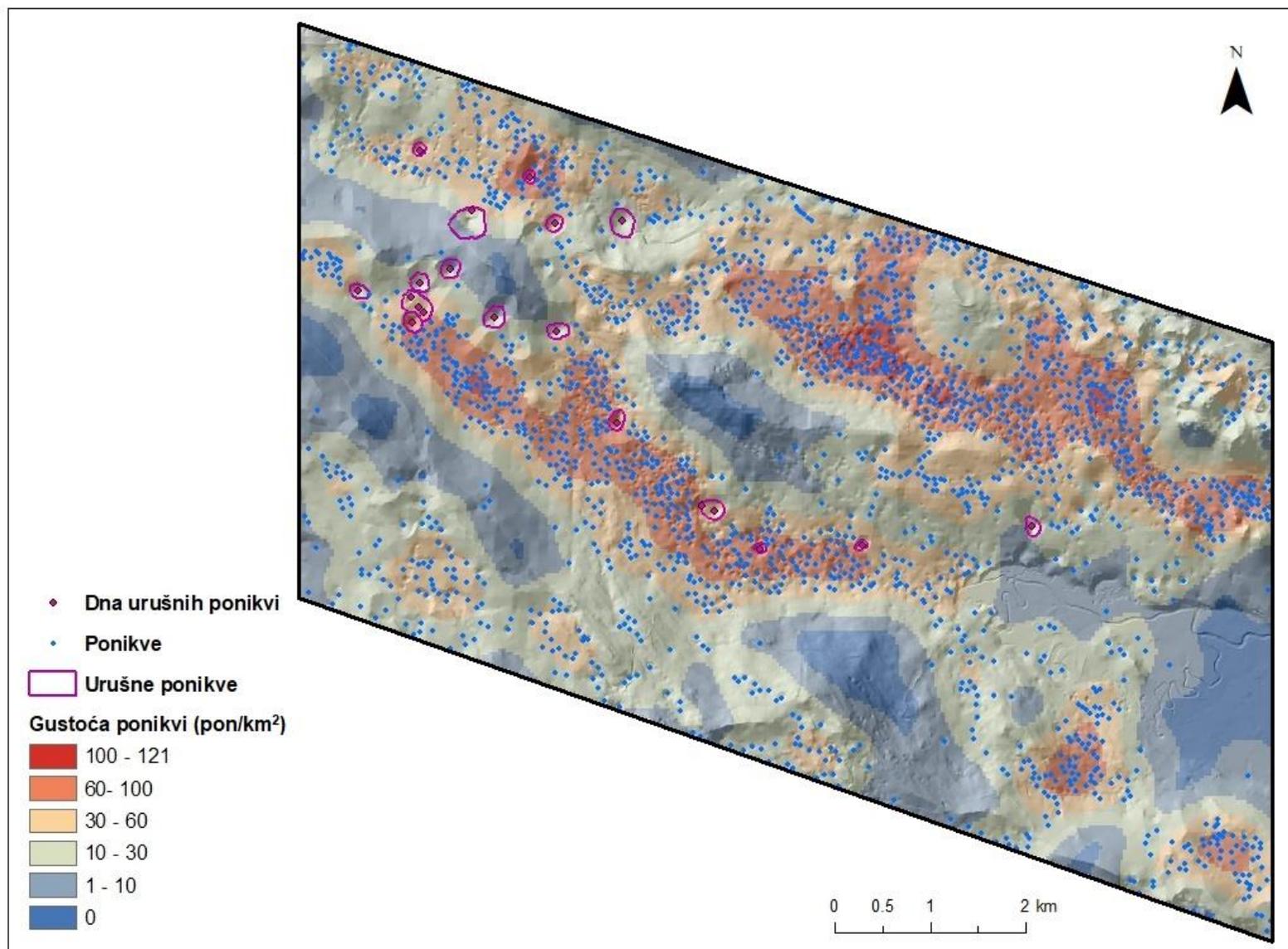
Izračunati su podaci gustoće ponikva po km<sup>2</sup> te su grupirani u pet razreda gustoće ponikava (sl. 12). Na istraživanom području postoje područja bez pojave ponikvi s 0 pon/km<sup>2</sup> dok je najveća izmjerena gustoća 121 pon/km<sup>2</sup>. Prosječna gustoća ponikvi istraživanog područja prema analizi DEM-a iznosi 30,24 pon/km<sup>2</sup> što je vrlo sličan broj podatku iz prijašnjih istraživanja prosječne gustoće ponikvi područja sjevernog Velebita koji iznosi 32,4 pon/km<sup>2</sup> (Faivre, 1992). Urušne su ponikve razvijene uglavnom na području manje gustoće ponikva, 5–40 pon/km<sup>2</sup>.

### 5.1.3. Geologija

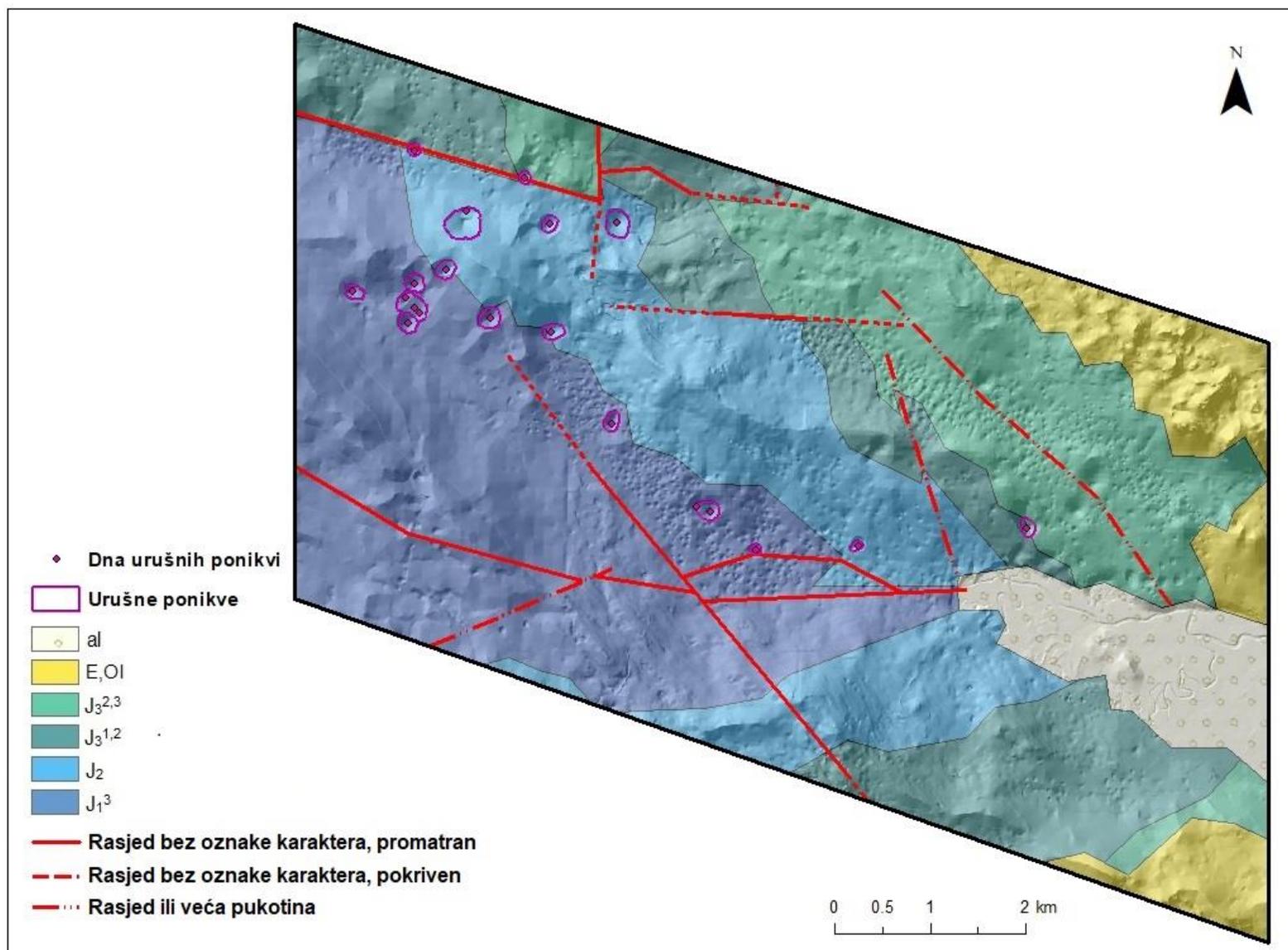
Velike urušne ponikve na području Markovog polja smještene su na vapnencima jurske starosti (sl. 13).

Na najstarijim naslagama, vapnencima donje jure nalazi se osam urušnih ponikvi. Za donju juru karakteristični su izvanredno uslojeni vapnenci s povremenim ulošcima dolomitiziranih vapnenaca i dolomita. Osam urušnih ponikvi nalazi se na području sedimenata srednje jure, deblje uslojenih vapnenaca sa slojevima dolomitiziranog vapnenca ili rubnog područja sedimenata srednje i gornje jure. Najistočnija urušna ponikva nalazi se u gornjojurskim vapnencima.

Karta prostornog rasporeda ponikava na geološkoj karti upućuje na to da je područje sa značajnom pojavom urušnih ponikava uz glavne rasjede te orijentirano pravcem SZ–JI. Tri urušne ponikve smještene su na rasjedu, a sedam ih je pravilno raspoređeno uz rasjed. Uz geološke granice nalazi se šest ponikvi.



Slika 12: Karta prostornog rasporeda ponikava i gustoće ponikvi Markovog polja

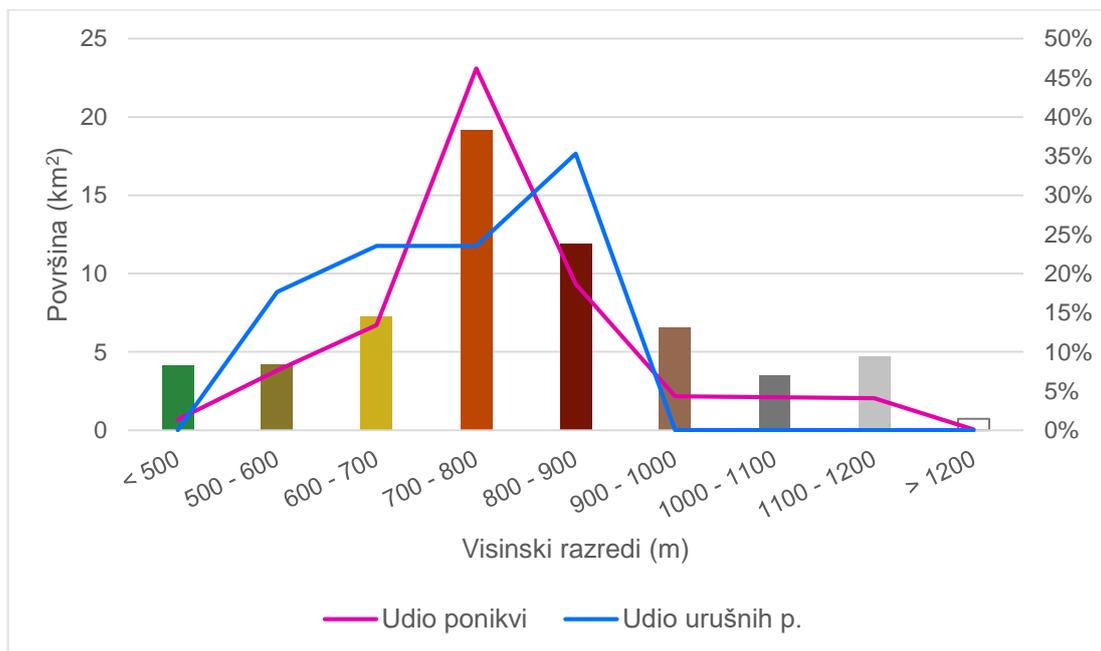


Slika 13: Prostorni raspored urušnih ponikva Markovog polja na geološkoj karti (Velić i dr., 1974)

#### 5.1.4. Hipsometrija

Tokom analize visinskih podataka izdvojeno je devet visinskih razreda raspona od 100 m. Analizom hipsometrijske karte (sl. 17), vidljivo je da istraživano područje ima jasno izražen dinarski pravac pružanja reljefa, linearno izdužen pravcem SZ–JI, iz čega slijedi relativno pravilan pojasni raspored visinskih katova.

U istraživanom području najniža vrijednost nadmorske visina iznosi 473 m, nalazi se u zapadnom dijelu Lipovog polja uz tok ponornice Like, a najviša nadmorska visina iznosi 1294 m na jugo-zapadnom dijelu istraživanog područja, na području Apatišana. Apsolutni raspon visinske razlike istraživanog područja iznosi 821 m. Kategorije najnižih i najviših razreda nadmorskih visina obuhvaćaju manje površine, a pola područja zauzimaju visinski razredi 700–800 m (31 %) i 800–900 m (19 %). Najniži hipsometrijski razred (473–500 m) obuhvaća Lipovo polje s 7 %, a iznad 1200 m izdižu se samo vršni dijelovi na JZ te zauzimaju 1 % ukupne površine. Prosječna nadmorska visina prostora iznosi 798 m.

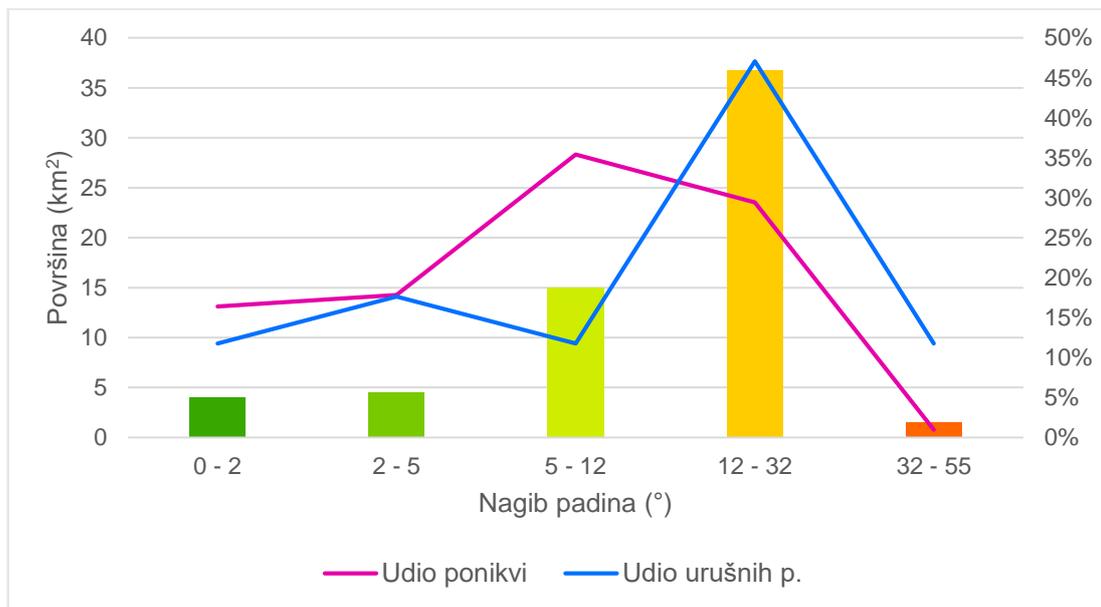


Slika 14: Distribucija hipsometrijskih razreda Markovog polja te udio ponikvi i urušnih ponikvi po razredima

U visinskim razredima 700–800 m i 800–900 m nalazi se dvije trećine ponikvi te velika većina urušnih ponikvi, s 46 % korozijskih i 24 % urušnih ponikvi u nižem razredu te 19 % korozijskih i 35 % urušnih u višem razredu (sl. 14).

### 5.1.5. Nagibi padina

Analizom DEM-a nagibi padina svrstani su u šest standardnih kategorija (sl. 18) te je utvrđen minimalni nagib padina istraživanog područja od 0° i maksimalan nagib od 79,65°. Prostorni raspored pojedinih kategorija nagiba padina jasno odražava konture raščlanjenog reljefa. Maksimalna vrijednost nagiba rezultat je računalne analize DEM-a rezolucije 5 x 5 m dok u stvarnosti postoje nagibi i preko te vrijednosti, ali zbog male površine se ovom metodom ne mogu razlučiti (Bočić i dr., 2012).



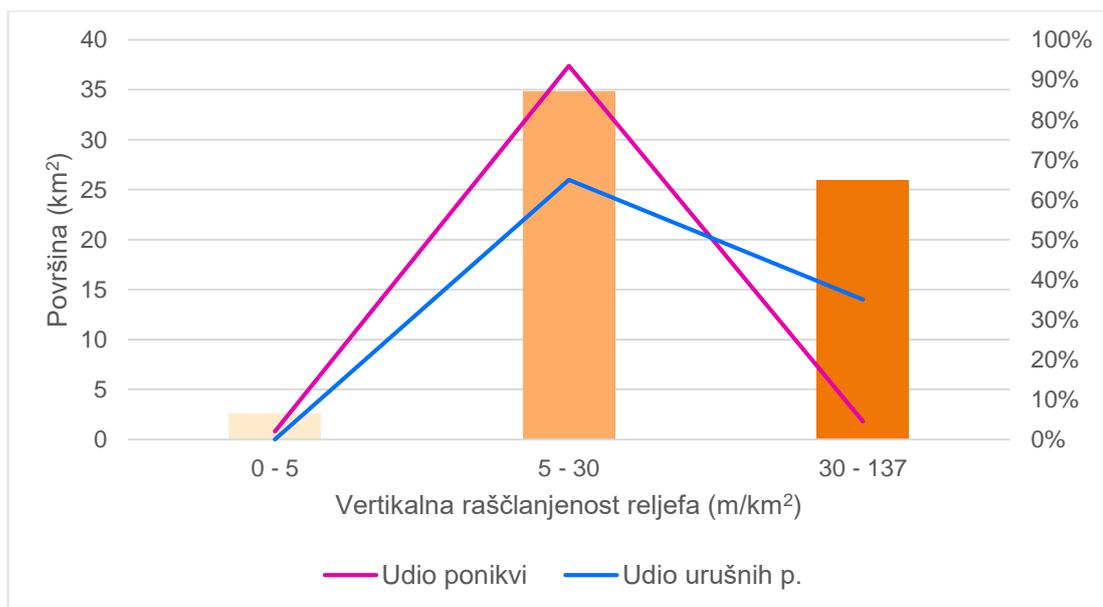
Slika 15: Distribucija kategorija nagiba padina Markovog polja te udio ponikvi i urušnih ponikvi po kategorijama

Najveći dio površine istraživanog prostora čini 4. kategorija jako nagnutih terena (12°–32°) s 59 % te 3. kategorija nagnutih terena (5°–12°) s 24 % koje skupa čine 5/6 površine istraživanog područja. Niže kategorije (1., 2. i djelomično 3.) najvećim se djelom vežu za dno Lipovog polja i dna ponikvi. Vrlo strmi teren (32°–55°) najvećim je dijelom vezan za padine urušnih ponikvi te zauzima 2 % istraživanog područja. Strmci (> 55°) izuzeti su iz slike 15 gdje je prikazana distribucija ponikvi i urušnih ponikvi po kategorijama nagiba padina jer se tamo ne pojavljuju ponikve, a površina ove kategorije je neznčajna. Šire područje Sjevernog Velebita obilježeno je velikim nagibima padina (Bočić i dr., 2012) dok je prosječni nagib padina u cijelom istraživanom području 14,85°.

Analiza odnosa gustoće ponikvi i nagiba padina unutar jedinične površine pokazuju silazni trend s porastom nagiba padina za sve ponikve općenito, a uzlazni trend za urušne ponikve (sl. 15). Najveći broj dna ponikva (35 %) zabilježen je u kategoriji nagiba padina 5°–12°, dok se pola od svih dna urušnih ponikvi (47 %) nalazi na području jako nagnutih terena, 12°–32° (sl. 15, sl. 18). U području vrlo strmog terena (32°–55°) nalazi se 12 % urušnih ponikva te samo 1 % korozijskih i ostalih ponikva.

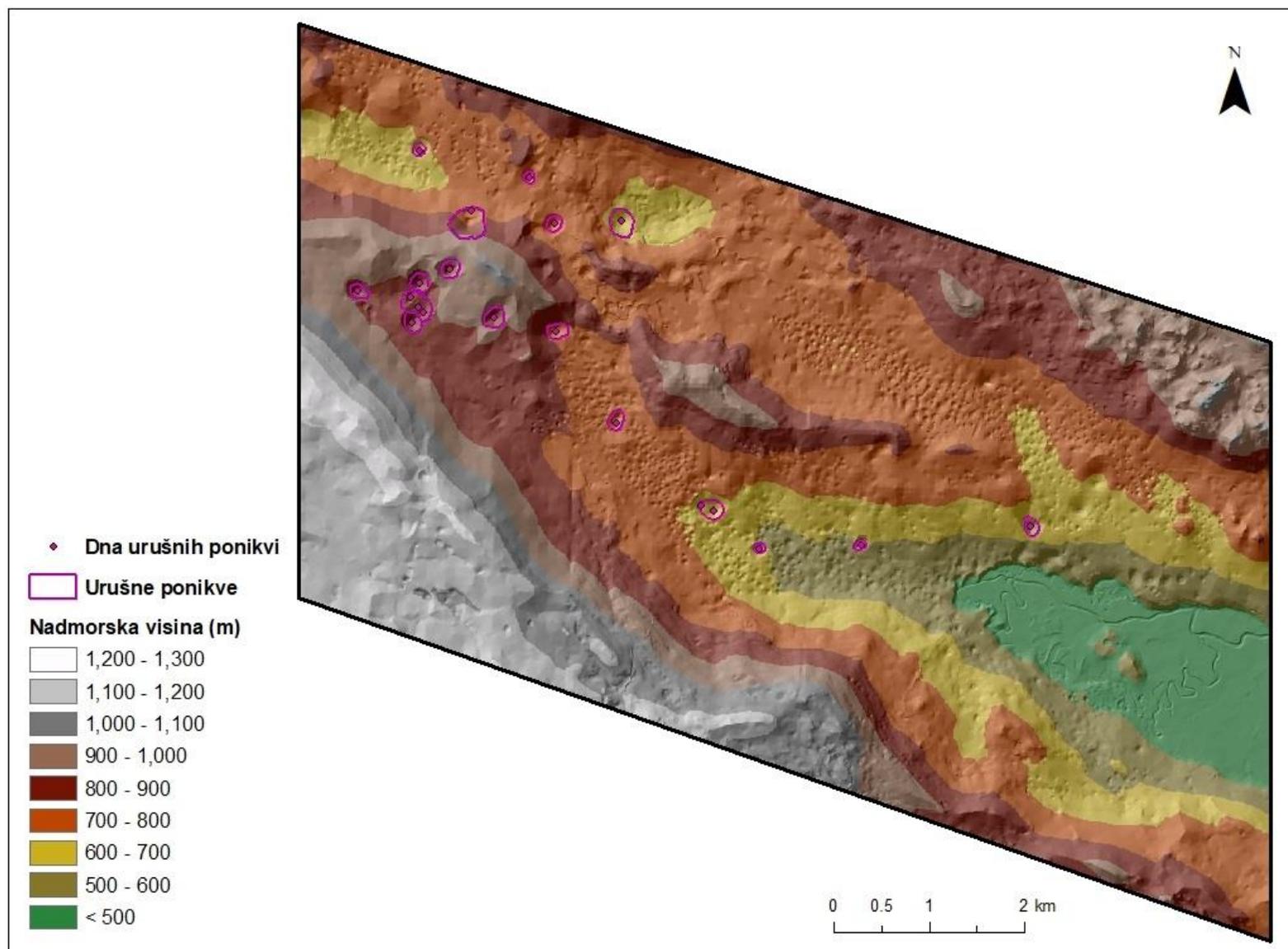
### 5.1.6. Vertikalna raščlanjenost reljefa

Analizom DEM-a izmjerena je minimalna raščlanjenost reljefa od 0 m/km<sup>2</sup> i maksimalna od 137,2 m/km<sup>2</sup>. Na temelju utvrđenog raspona između najviše i najniže vrijednosti i standardnih šest kategorija vertikalne raščlanjenosti reljefa, određene su tri kategorije raščlanjenosti reljefa: zaravnjen reljef (0–5 m/km<sup>2</sup>) koji zauzima 4 % površine, slabo raščlanjene ravnice (5–30 m/km<sup>2</sup>) koje zauzimaju 55 % i slabo raščlanjen reljef (30–137 m/km<sup>2</sup>) koji zauzima 41 % površine istraživanog područja (sl. 19). Prosječna vertikalna raščlanjenost Markovog polja iznosi 27,91 m/km<sup>2</sup>, što prema standardnoj raspodjeli vertikalne raščlanjenosti za područje Hrvatske smješta ovo područje u kategoriju slabo raščlanjene ravnice (Lozić, 1995). Na povećanje raščlanjenosti utječe okršavanje i razvoj dubokih ponikva te aktivna tektonika, a rasjed Krasno – Lipovo polje jedna je od najznačajnijih rasjednih zona Velebita (Bočić i dr., 2019).

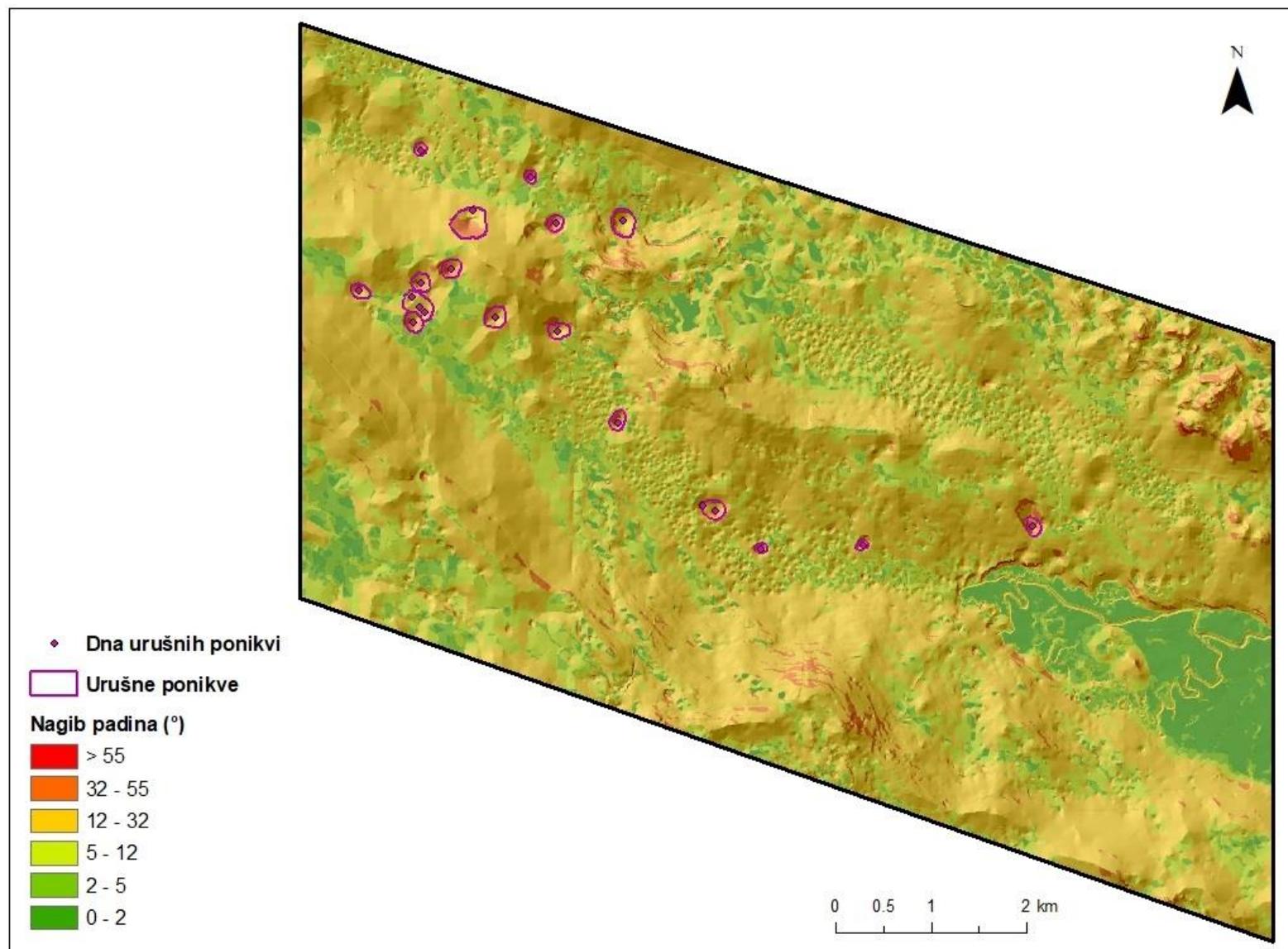


Slika 16: Distribucija kategorija vertikalne raščlanjenosti reljefa Markovog polja područja te udio ponikvi i urušnih ponikvi po kategorijama

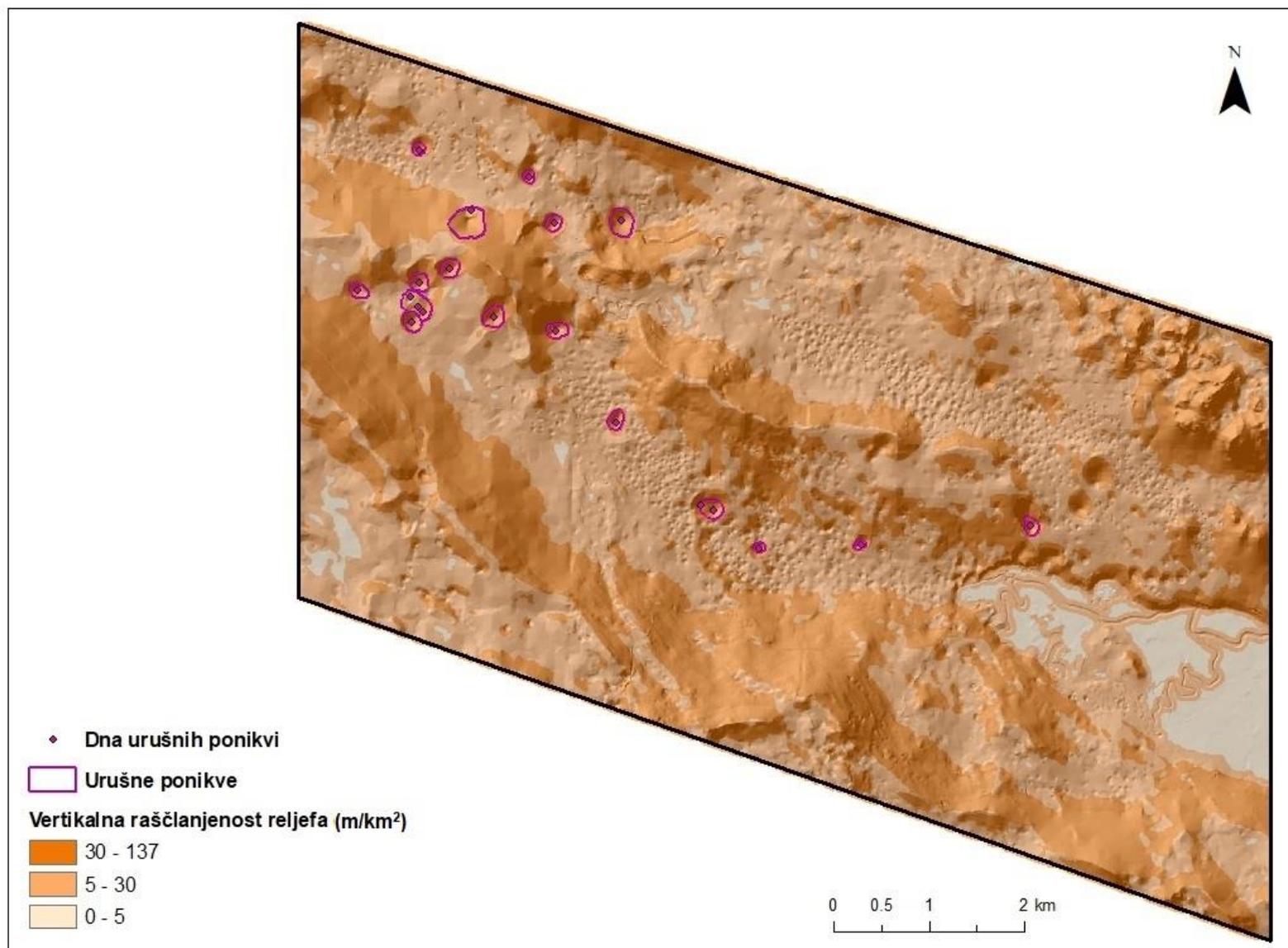
Gotovo sve korozijske i ostale ponikve, njih 93 %, nalaze se na području slabo raščlanjene ravnice (5–30 m/km<sup>2</sup>), dok se na istom području nalazi 65 % dna urušnih ponikvi (sl. 16). Iako se ostalih 35 % dna urušnih ponikvi, njih 7, nalazi na prostoru najviše kategorije vertikalne raščlanjenosti reljefa od 30 do 137 m/km<sup>2</sup>, obodi svih urušnih ponikvi nalaze se na prostorima više kategorije (sl. 19). Relativno mala gustoća urušnih ponikva u području malih vrijednosti vertikalne raščlanjenosti reljefa veže se uz činjenicu da i same ponikve svojom dubinom pridonose raščlanjenosti tog područja (Pahernik, 2012) pa tako i padine urušnih ponikva povećavaju raščlanjenost.



Slika 17: Karta prostornog rasporeda urušnih ponikvi Markovog polja u odnosu na visinske razrede



Slika 18: Karta prostornog rasporeda urušnih ponikvi Markovog polja u odnosu na kategorije nagiba padina



Slika 19: Karta prostornog rasporeda urušnih ponikvi Markovog polja u odnosu na kategorije vertikalne raščlanjenosti reljefa

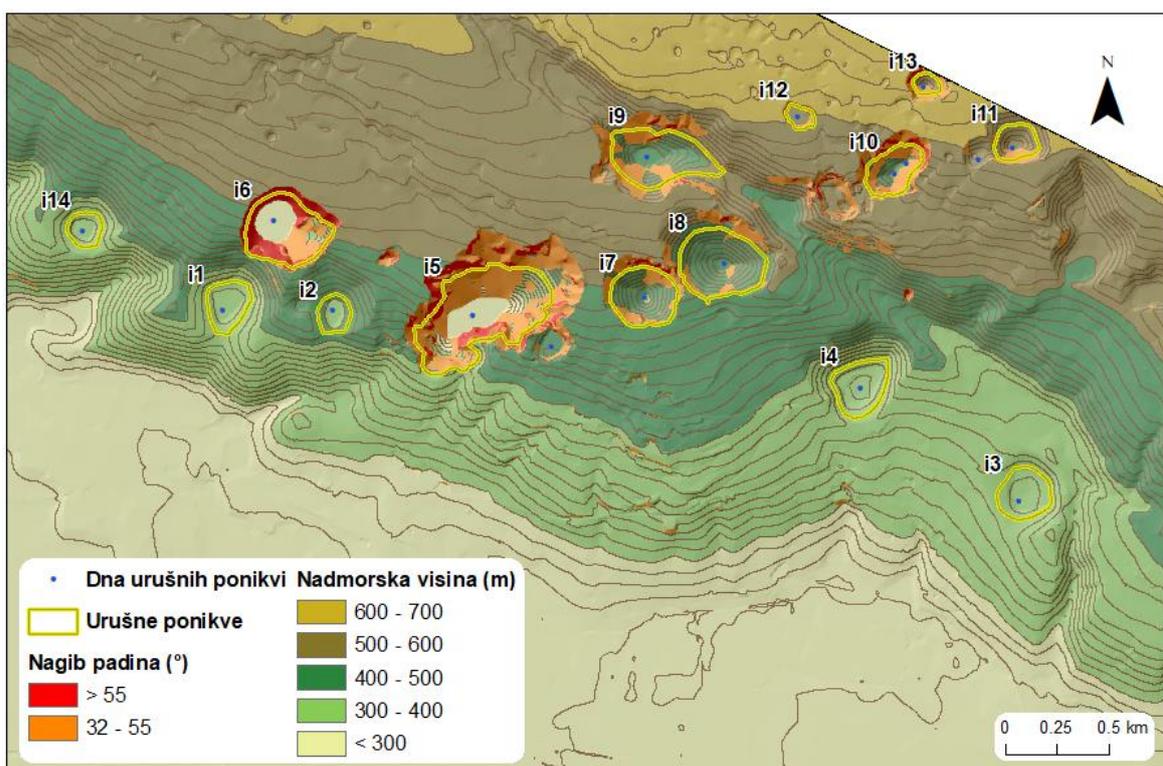
## 5.2. Imotsko polje

### 5.2.1. Urušne ponikve

Na rubnom, vapnenačkom dijelu Imotskog polja zabilježeno je 27 urušnih ponikvi koje su grupirane u dvije veće grupe te su zato i u analizi izdvojene i promatrane kao grupe ponikvi.

#### Ponikve na širem području Imotskog

Na širem području grada Imotski nalazi se 14 urušnih ponikvi (sl. 20) koje su zabilježene u tablici 9 s dubinama, volumenima i površinama te su navedena morfometrijska obilježja dna ponikvi koja su analizirana u ovom radu. Ponikve i10 i i11 su složene ponikve s dva dna te zato u tablici nema naznačene površine i volumena za te točke. Ponikve u tablici 9 sortirane su prema površini ponikva od najveće do najmanje.



Slika 20: Urušne ponikve na širem području Imotskog

Dna ponikva nalaze se između 262 i 575 m nadmorske visine, s prosječnom visinom od 419 m, a obzirom na vertikalnu raščlanjenost reljefa, dna ponikva se nalaze od 0 do 64,3 m/km<sup>2</sup>, s prosjekom od 22,7 m/km<sup>2</sup>. Ponikve na ovom području nalaze se na području gustoće pojave ponikva 3–25 pon/km<sup>2</sup>, a prosječna gustoća iznosi 7,8 pon/km<sup>2</sup>.

Tablica 9: Dubine, površine i volumeni urušnih ponikva na širem području Imotskog te morfometrijska obilježja točaka u kojima su zabilježena njihova dna

ID	Toponimi	Nadmorska visina dna (m)	Dubina (m)	Površina (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Područje nagiba (°)	Područje vertikalne raščlajenosti (m/km <sup>2</sup> )	Područje gustoće ponikava (pon/km <sup>2</sup> )
i5	Modro jezero	261,98	117,60	218 500	14 677 151,87	0,01	0,01	3,83
i8	Džardin	401,73	78,26	111 000	3 650 576,56	3,78	24,16	4,42
i6	Crveno jezero	264,51	167,15	108 300	11 027 228,71	0,16	0,40	4,19
i9	Solun	443,71	66,13	105 500	3 079 104,46	0,29	8,28	5,20
7	Suvo jezero	395,96	74,86	75 224,12	2 713 281,11	23,86	28,59	3,71
i4	Rebića dolac	328,94	20,87	57 249,57	1 117 883,49	0,59	2,03	2,99
i3	Žderin dolac	322,50	17,59	51 788,73	538 932,37	2,91	10,09	3,00
i10	Katunište	470,73 469,50	61,92	48 173,22	1 815 473,34	28,78 33,40	47,76 64,28	14,79 16,33
i1	Marčin dolac	354,38	14,80	41 224,37	255 824,67	1,41	10,92	3,13
i11	Aračići	575,29 536,52	38,90	29 768,82	552 080,62	19,49 2,65	27,75 37,88	13,92 8,48
i2	Vujičića dolac	394,99	14,60	24 274,49	125 597,48	3,26	11,47	3,07
i14	Rašića dolac	354,68	15,89	22 877,35	275 428,99	2,21	10,72	2,99
i12	Pon. ispod Slavićevaca	573,97	17,80	11 793,65	165 704,70	1,42	29,43	25,22
i13	Kozjak	561,69	25,41	10 549,89	122 990,27	38,68	49,33	10,23

Promatrajući površine i volumene ponikvi vidljivo je kako se na prostoru Imotskog nalaze velike urušne ponikve čije su površine veće od 100 000 m<sup>2</sup> kad se promatra površina najviše zatvorene izohipse, dok su im stvarne površine mnogo veće. Površinom i volumenom najveća je ponikva u kojoj se nalazi Modro jezero, a zatim slijede ponikve Džardin, Crveno jezero i Solun. Površine ponikvi se kreću između 10 550 i 218 500 m<sup>2</sup>, a prosječna površina iznosi 69,420 km<sup>2</sup>, dok volumeni iznose 122 990–14 677 150 m<sup>3</sup>,

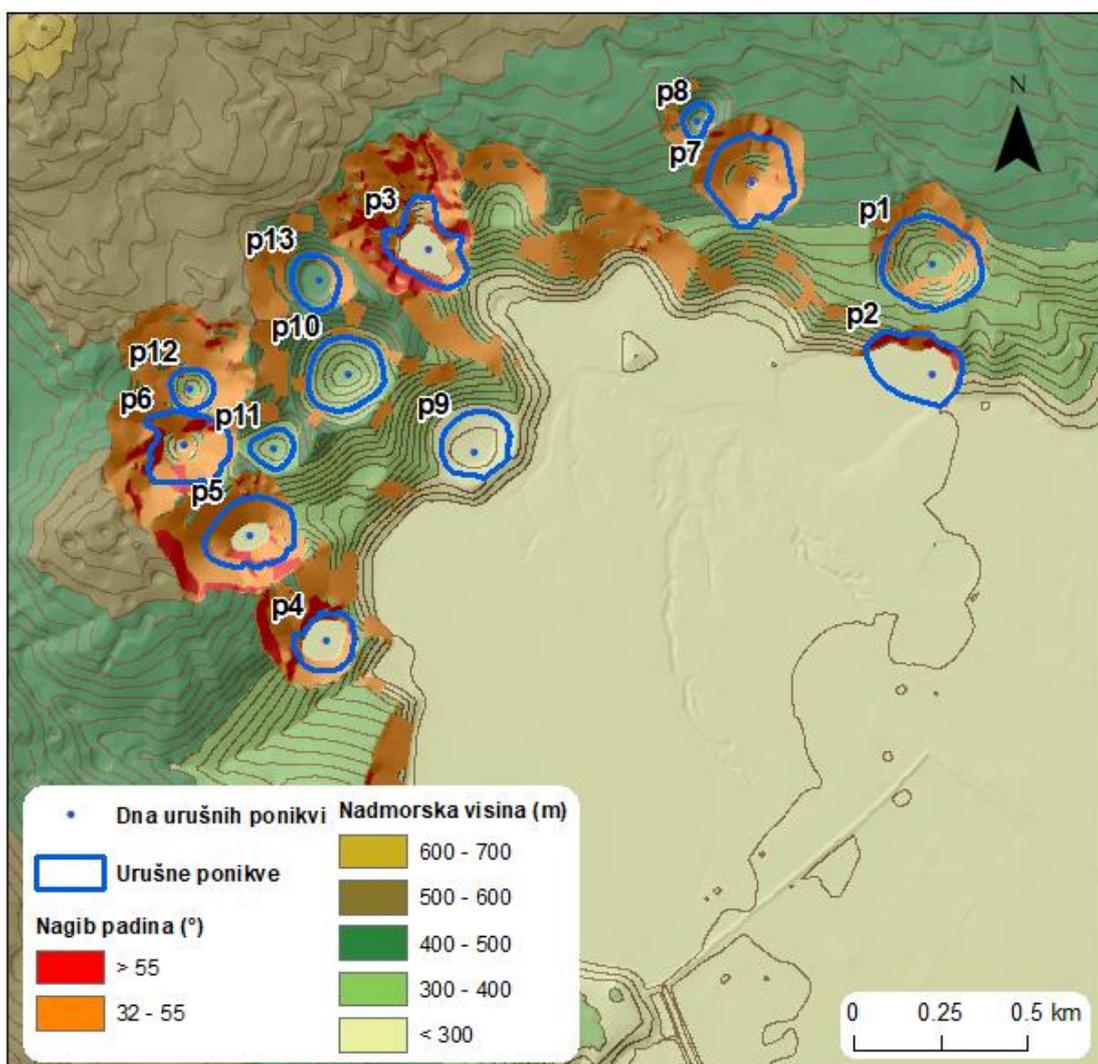
u prosjeku  $2\,865\,520\text{ m}^3$ . Dubine ponikava iznose od 14,60 do 167,15 m, a prosječna dubina 52,27 m. Najdublja je ponikva u kojoj se nalazi Crveno jezero, zatim slijede Modro jezero, Džardin i Suvo jezero. Nije uočen dominantan pravac izduženosti oboda ponikva.

Ako proučavamo nagib terena, ponikve možemo podijeliti u tri grupe; prvu grupu čine ponikve čiji nagibi padina iznose više od  $45^\circ$ , a u nju pripada ponikva u kojoj se nalazi Crveno jezero te djelomično ponikva u kojoj se nalazi Modro jezero (ponikve i5 i i6). Drugu grupu čine ponikve čiji nagib padina je u rasponu  $32^\circ$ – $45^\circ$ , makar su kod nekih ponikva prisutne padine s nagibima iznad  $45^\circ$ . U drugu grupu pripadaju ponikve i7, i8, i9, i10, i11, i12 i i13. Treću grupu prema nagibu padina, čine ponikve s padinama čiji nagibi su između  $25^\circ$  i  $32^\circ$ , a u nju pripadaju i1, i2, i3, i4 i i14. Tim je ponikvama dno zaravnjeno i prekriveno tlom dajući im zdjelast oblik (Maršić, 2011).

U određenim ponikvama prisutna je vodena površina, Crveno jezero stalna je vodena površina, a u ponikvi Modro jezero prisutnost vode je periodična. U ponikvi Rebića dolac, također zvanj Brista ili Vilenica prisutnost vode je povremene naravi u razdoblju visokih voda kada karbonatno podzemlje ne može propustiti svu vodu prema najnižoj erozijskoj bazi ova ponikva postaje povremeni izvor (Zdilar, 2015). Ponikve šireg Imotskog područja nalaze se iznad zone izvora (Maršić, 2011).

## Ponikve na području Lokvičića

Na području općine Lokvičići, sjeverno i zapadno od Prološkog blata nalazi se 13 urušnih ponikvi (sl. 21). Imena, površine i volumeni ponikva kao i morfometrijska obilježja dna ponikvi prikazane su u tablici 10. Ponikve su sortirane prema površini, od najveće prema najmanjoj.



Slika 21: Urušne ponikve na području Lokvičića

Dno najniže ponikve nalazi se na 259 m, a najviše na 406 m nadmorske visine, s prosjekom od 316 m. Kada gledamo ponikve u odnosu na vertikalnu raščlanjenost reljefa, njihova dna nalaze se na područjima od 0 do 55 m/km<sup>2</sup> s prosjekom od 20,7 m/km<sup>2</sup>. Ove se ponikve nalaze u području male gustoće ponikvi od 1,5 do 12 pon/km<sup>2</sup>. Nije uočen dominantan pravac izduženosti oboda ponikva.

Ponikve na području Lokvičića daleko su manje od ponikva u okrugu Imotskog. Najvećoj ponikvi na ovom prostoru, Maloj vrbini površina iznosi 59 310 m<sup>2</sup>, dok je najveća ponikva

volumenom Suvo jezero (ponikva ispod Bekavaca) s volumenom od 2 139 493 m<sup>3</sup>. Izmjerivi volumeni ponikva ovog prostora iznose 80 120–2 139 490 m<sup>3</sup>, a površine oboda ponikvi prema najvišoj zatvorenoj izohipsi 6 060–59 300 m<sup>2</sup>. Prosječan volumen iznosi 826 270 m<sup>3</sup>, a prosječna površina ponikve 31 425 m<sup>2</sup>. Dubine ponikva iznose od 14,18 do 96,28 m, dok je prosječna dubina ponikvi 43,55 m. Najdublje su ponikve Suvo jezero, Velika vrbina i Knezovića jezero.

Tablica 10: Dubine, površine i volumeni urušnih ponikva na području Lokvičića te morfometrijska obilježja točaka u kojima su zabilježena njihova dna

ID	Toponimi	Nadmorska visina dna (m)	Dubina (m)	Površina (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Područje nagiba (°)	Područje vertikalne raščlanjenosti (m/km <sup>2</sup> )	Područje gustoće ponikava (pon/km <sup>2</sup> )
p1	Mala vrbina	308,90	50,15	59 310,66	1 344 181,30	1,45	13,07	2,99
p7	Velika vrbina	297,10	91,57	49 153,68	1 785 428,06	7,19	43,09	5,21
p2	Prološko jezero	264,86	63,36	43 730,74	310 591,62	0,01	0,01	1,56
p5	Knezovića jezero	265,75	75,27	41 496,18	1 796 270,99	0,03	19,89	11,08
p6	Suvo jezero	279,27	96,28	41 043,68	2 139 493,87	15,50	55,23	11,80
p3	Jezero Galipovac	259,20	39,02	37 457,68	1 146 691,32	0,00	9,08	4,59
p10	Donja rupa	346,30	32,95	37 133,08	723 983,46	0,99	15,12	7,69
p9	Pratarski dolac	275,50	15,20	30 120,85	154 888,23	0,91	9,24	3,36
p4	Mamića jezero	271,95	29,02	22 956,54	659 907,87	0,59	3,92	3,89
p13	Gornja rupa	401,01	19,34	17 525,00	235 036,12	0,92	15,41	6,29
p12	Rupa Bobovišće	355,63	24,21	11 835,93	241 535,31	6,15	25,40	7,77
p11	Štrlića vinograd	376,30	14,18	10 702,54	123 375,65	3,29	16,49	10,50
p8	Petričeva vrbina	405,86	15,63	6 064,45	80 124,99	2,96	42,51	5,45

Prema nagibu i obliku terena ponikve dijelimo u tri grupe. Prva su grupa ponikve s padinama iznad  $45^\circ$  i to su ponikve p2, p3, p4 i p5 koje su ujedno i ponikve čija su dna prekrivena stalnom vodenom površinom. Drugu grupu čine ponikve čije su padine u rasponu nagiba  $32^\circ$ – $45^\circ$ , dno ovih ponikvi nije zaravnjeno, prekriveno je trošinama stijena te su na dijelovima padina mjestimično prisutni nagibi veći od  $45^\circ$ . U drugu skupinu pripadaju ponikve p6, p7, p8 i p12, takve padine i dna ponikvama daju ljevkasti oblik (Maršić, 2011). Treća grupa ponikva čine ponikve čije su padine nagiba između  $25$  i  $32^\circ$ , dno im je zaravnjeno te su zdjelastog oblika, a u nju pripadaju ponikve p1, p9, p10, p11 i p13. Navedeni prostor nalazi se u zoni izvora (Maršić, 2011).

Ponikve p3, p4 i p5 u hidrogeološkom smislu su estavele (Bonacci i Roje-Bonacci, 2000).

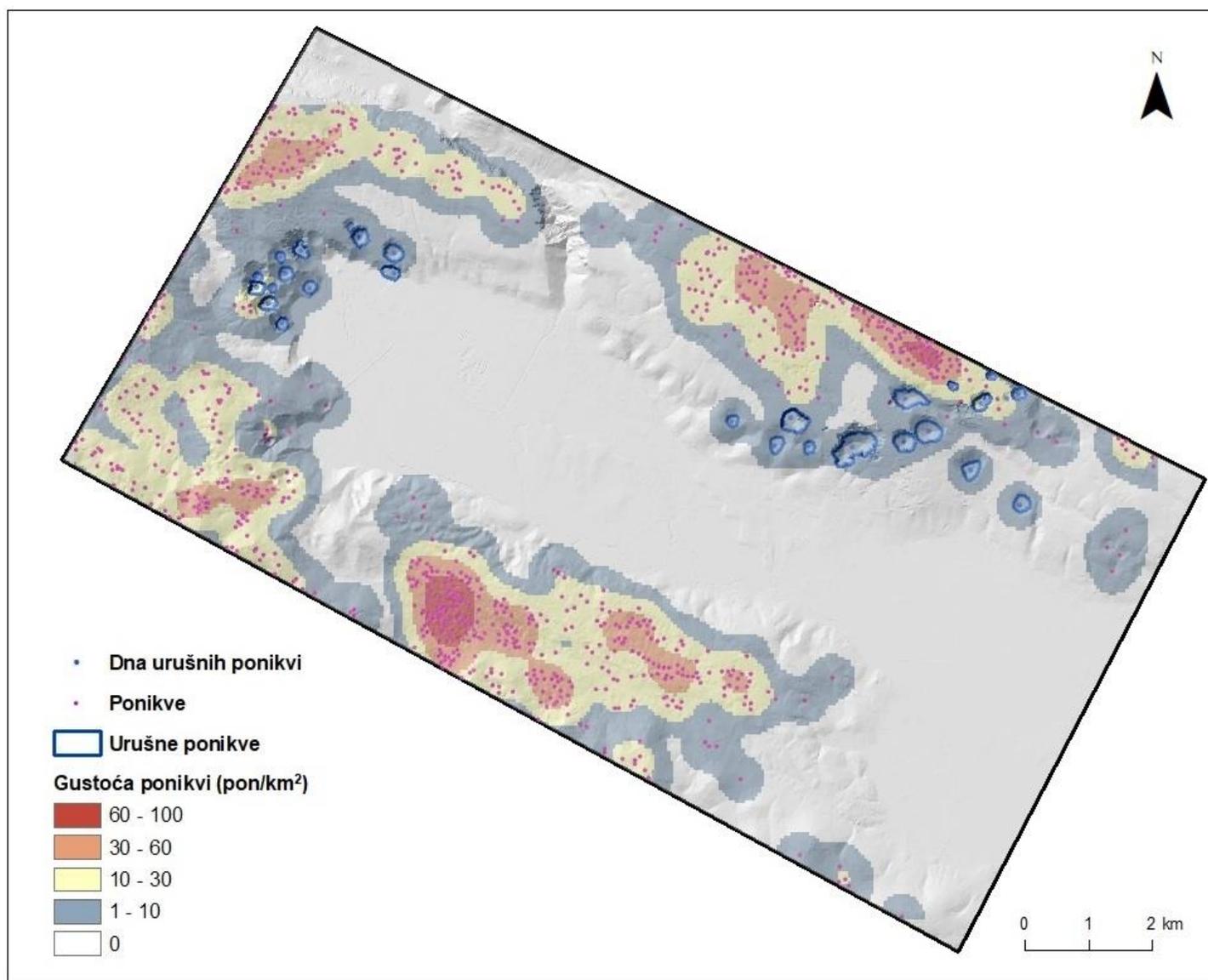
Proces nastanka ponikvi je recentan što dokazuju i urušavanja koja su se dogodila 1946. i 1957. godine na ovom prostoru. Nakon prvog urušavanja nastala je ponikva čiji je promjer bio oko 8 m, a dubina oko 25 m, zapadno od ponikve p12 u selu Knezovići. Tom prilikom urušilo se nekoliko stambenih i gospodarskih objekata (Ujević, 1951). Drugim urušavanjem 1957. u okolici Prološkog blata nastala su dva mala jezera promjera 13 i 20 m, dubine veće od 5m (Ujević, 1957). Ponikva nastala 1946. godine danas je zatrpana otpadnim materijalom, a na poravnatom prostoru izgrađeno je igralište (Maršić, 2011).

### 5.2.2. Prostorni raspored i gustoća ponikava

Površina istraživanog područja iznosi  $128,5 \text{ km}^2$  te su na njemu utvrđene 854 ponikve, što čini prostornu gustoću ponikava od  $6,6 \text{ pon/km}^2$ . Izuzme li se područje na kojem nema razvijenih ponikava, na površini od  $58,8 \text{ km}^2$  gustoća ponikava iznosi  $14,5 \text{ pon/km}^2$ .

Pomoću GIS-a izračunati su podaci gustoće ponikva po  $\text{km}^2$  te su grupirani u četiri razreda gustoće ponikava (sl. 22). 54 % istraživanog područja je bez pojave ponikvi, od kojeg je najveći dio zavalu Imotskog polja. Najveća izmjerena gustoća je  $98 \text{ pon/km}^2$ , a prosječna gustoća ponikvi istraživanog područja prema analizi DEM-a iznosi  $6,22 \text{ pon/km}^2$ .

Urušne su ponikve razvijene na području manje gustoće ponikva ( $3$ – $24 \text{ pon/km}^2$ ) s prosjekom pojave dna urušne ponikve na  $8 \text{ pon/km}^2$ .



Slika 22: Karta prostornog rasporeda ponikava i gustoće ponikvi Imotskog polja

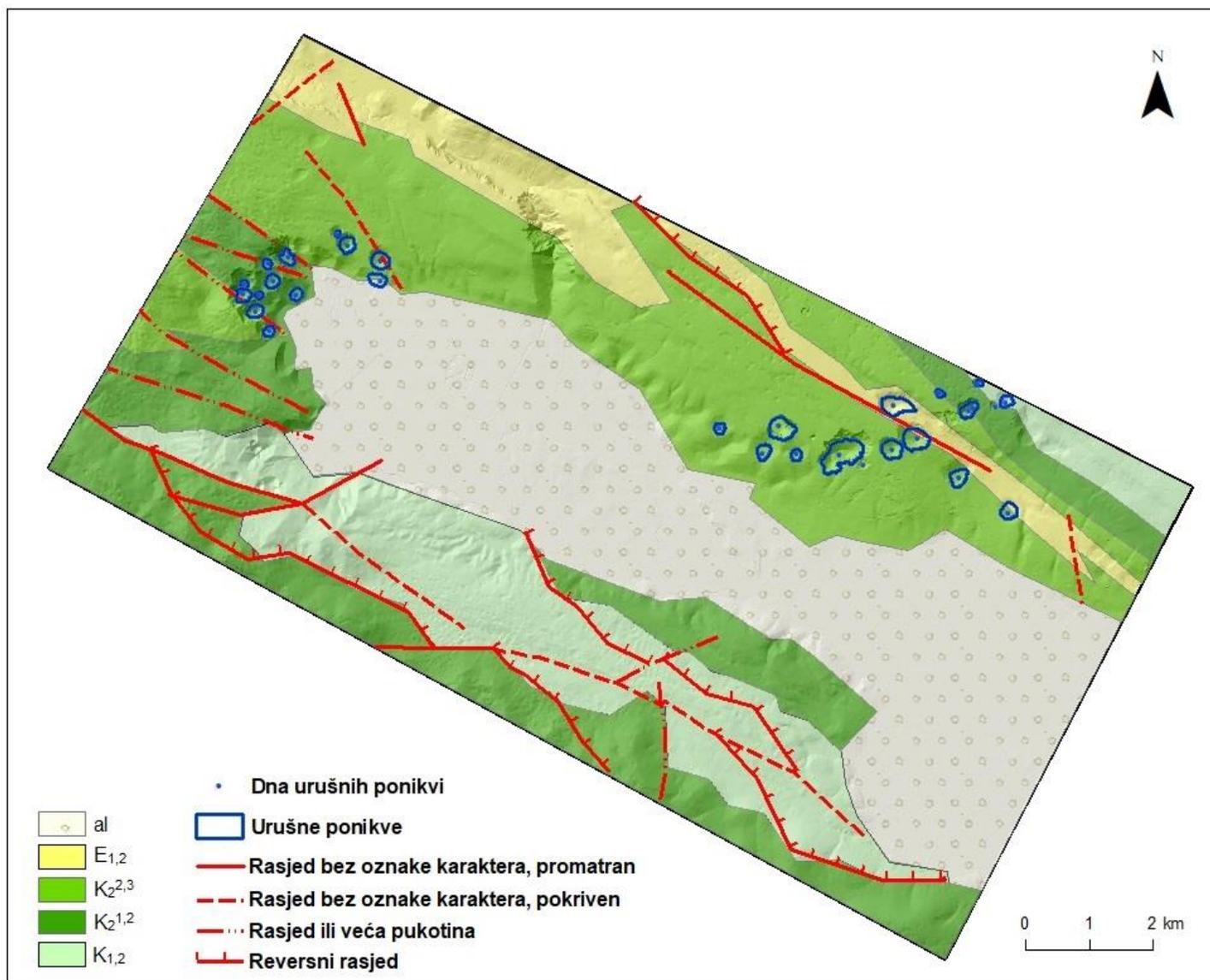
### 5.2.3. Geologija

Velike urušne ponikve na području Imotskog polja smještene su na vapnencima kredne starosti (sl. 23).

U široj okolini Imotskog deset je urušnih ponikvi, uključujući i najveće tri ponikve, u najmlađim gornjokrednim naslagama. Te su naslage izgrađene od slabo uslojenih i masivnih vapnenaca bogatim rudistnom faunom. Ostale četiri ponikve na ovom području su u vapnencima s prijelaza donje krede na gornju kredu, gornje krede te eocena. Ovo je područje antiklinale Posušje – Sobač koja se proteže u pravcu SZ–JI te se uz antiklinalu protežu naslage alveolinsko-numulitnih vapnenaca donjeg i srednjeg eocena.

Ponikve u kojima se nalaze Modro i Crveno jezero nalaze se u zoni normalnog rasjeda te su nastali njegovim širenjem. U zoni rasjeda gdje se nalazi Modro jezero uočen je niz paralelnih strmo uzdignutih rasjeda (Zdilar, 2015).

Na području Lokvičića najveće tri urušne ponikve smještene su u najmlađim gornjokrednim naslagama građenih od slabo uslojenih i masivnih vapnenaca bogatim rudistnom faunom. Ostale ponikve, površinom manje, ali dublje, nalaze se u starijim gornjokrednim, dobro uslojenim vapnencima s hondrodontama te mjestimičnim ulošcima dolomita. Spomenuto područje je razlomljeno te karakterizirano normalnim rasjedima. Na ponikvama gdje je Knezovića jezero i Mamića jezero razbire se zona normalnih rasjeda u kojoj su širenjem prostora nastale duboke ponikve (Zdilar, 2015).

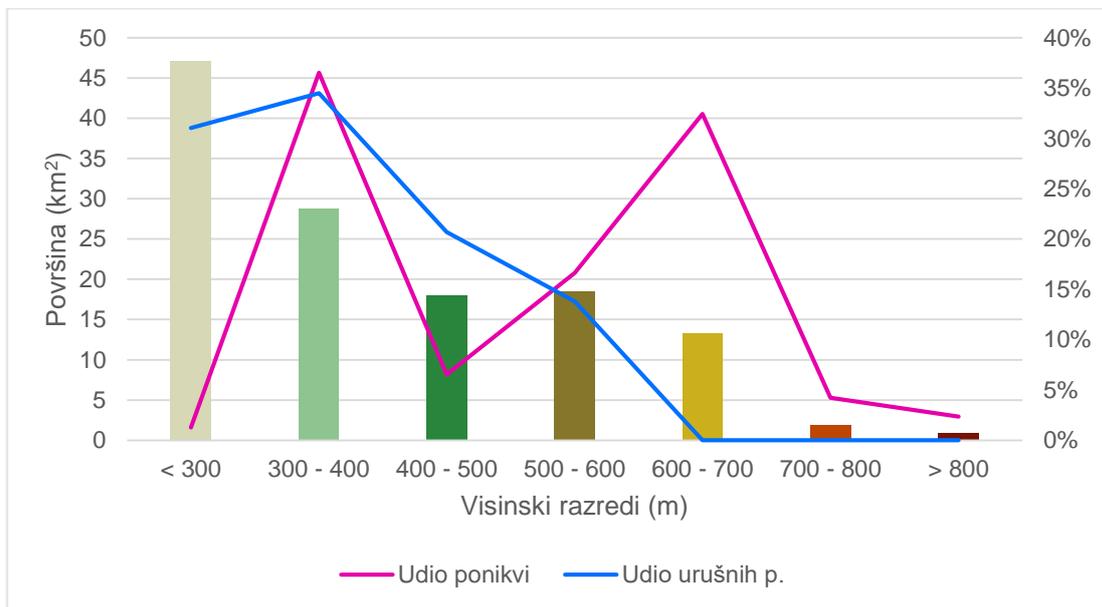


Slika 23: Prostorni raspored urušnih ponikva Imotskog polja na geološkoj karti (Raić i dr., 1977)

#### 5.2.4. Hipsometrija

Tokom analize visinskih podataka izdvojeno je sedam visinskih razreda raspona po 100 m (sl. 27). Dno Imotskog polja najnižeg je hipsometrijskog razreda te se tamo nalazi najniža vrijednost nadmorske visine istraživanog područja koja iznosi 265 m, a najviša točka je vrh Veli Vilinjak s nadmorskom visinom od 887 m na zapadnom dijelu istraživanog područja. Apsolutni raspon visinske razlike istraživanog područja iznosi 622 m. Najveći dio istraživanog područja obuhvaća visinski razred do 300 m nadmorske visine (37 %) koji predstavlja zavalu Imotskog polja (sl. 27). Zavala Imotskog polja linearno je izdužena u pravcu SZ–JI, ima jasno izražen dinarski pravac pružanja reljefa. Od dna zavale prema okolnom brdsko-zaravanskom okviru visinske se kategorije pravilno izmjenjuju.

Visinski razred 300–400 m zauzima 22 % površine te ga slijede razredi 400–500 m i 500–600 m koji zauzimaju po 14 % površine, a razred 600–700 m zauzima 10 % ukupne površine istraživanog područja. Iznad 700 m nadmorske visine izdižu se samo vršni dijelovi na zapadu te zauzimaju 2 % ukupne površine. Prosječna nadmorska visina prostora iznosi 401 m.



Slika 24: Distribucija hipsometrijskih razreda Imotskog polja te udio ponikvi i urušnih ponikvi po razredima

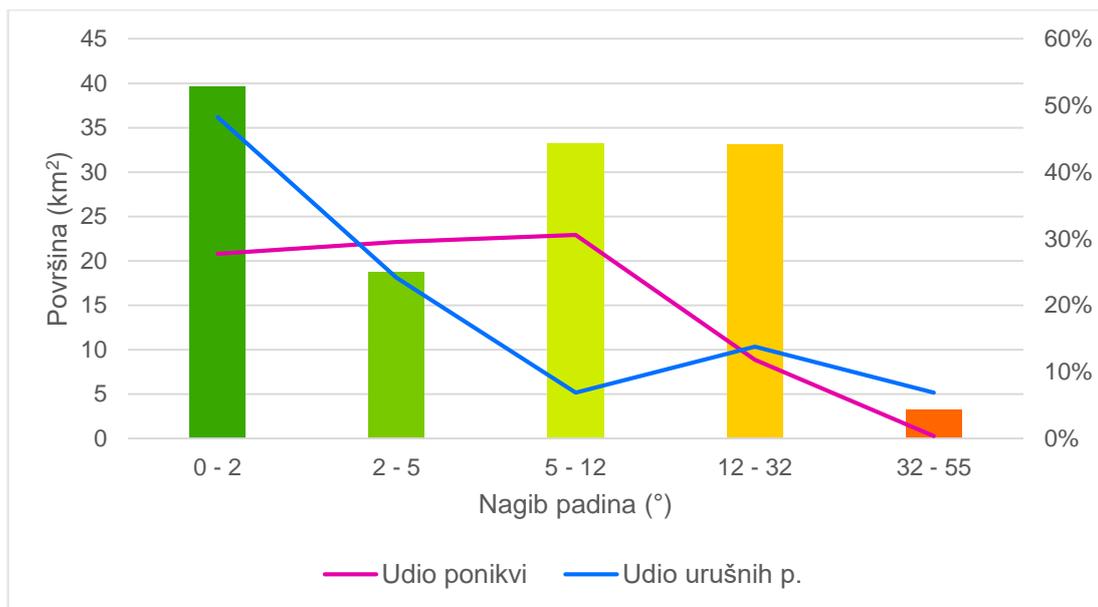
Najviše se ponikvi nalazi u visinskim razredima 300–400 m i 600–700 m s 37 % i 32 % od ukupnog broja ponikvi te u razredu 500–600 m s 17 % dok su u ostalim visinskim razredima je manje od 7 % promatranih ponikvi (sl. 24).

Kada proučavamo pojavu urušnih ponikvi, situacija je drugačija te se dna urušnih ponikvi pojavljuju obrnuto proporcionalno od porasta nadmorske visine. Od 29 urušnih ponikvi u najnižim razredima, < 300 m te 300–400 m, pojavljuje se 9 tj. 31 % i 10 tj. 34 % ponikvi. Slijede razredi 400–500 m s 6 ponikvi (21 %) i 500–600 m s 4 ponikve (14 %), dok se u višim razredima urušne ponikve ne pojavljuju.

#### 5.2.5. Nagibi padina

Nagibi padina svrstani su u šest standardnih kategorija (sl. 28) te je analizom DEM-a utvrđen minimalni nagib padina istraživanog područja od  $0^\circ$  i maksimalan nagib od  $83,57^\circ$ . Prosječni nagib padina u cijelom istraživanom području iznosi  $8,63^\circ$ . Prostorni raspored pojedinih kategorija nagiba padina jasno odražava konture raščlanjenog reljefa.

Najveći dio površine istraživanog prostora čini prva kategorija zaravnjenih terena ( $0^\circ$ – $2^\circ$ ) s 31 %, koji su uglavnom na području dna zavale Imotskog polja. Nagnuti tereni ( $5^\circ$ – $12^\circ$ ) i jako nagnuti tereni ( $12^\circ$ – $32^\circ$ ) čine više od pola istraživanog područja, jednako su zastupljeni te zauzimaju svaki po 26 %. Nagnuti i jako nagnuti teren zastupljen je najviše na obodu zavale gdje se javlja spiranje, erozija i kretanje masa. Vrlo strmi teren ( $32^\circ$ – $55^\circ$ ) najvećim je dijelom vezan za padine urušnih ponikvi i probojnicu Suvaje te zauzima 3 % istraživanog područja (sl. 25). Strmci ( $> 55^\circ$ ) su izuzeti iz slike 25 gdje je prikazana distribucija ponikvi i urušnih ponikvi po kategorijama nagiba padina jer se tamo ne pojavljuju dna ponikvi te je površina ove kategorije neznčajna, a strmci se javljaju na padinama nekih urušnih ponikva koje su detaljnije prikazane.



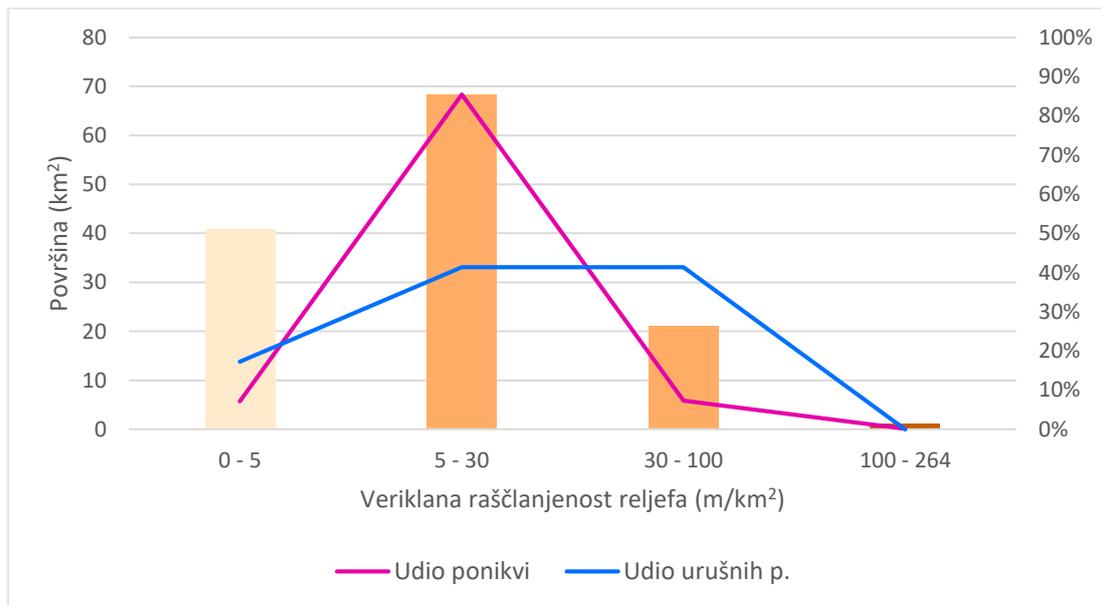
Slika 25: Distribucija kategorija nagiba padina Imotskog polja te udio ponikvi i urušnih ponikvi po kategorijama

Analiza odnosa gustoće ponikvi i nagiba padina unutar jedinične površine pokazuje silazni trend s porastom nagiba padina za urušne ponikve, 48 % dna urušnih ponikva nalazi se na području zaravnjenih terena ( $0^{\circ}$ – $2^{\circ}$ ), 24 % na području blago nagnutih terena ( $2^{\circ}$ – $5^{\circ}$ ) te 7 % na području nagnutih terena ( $5^{\circ}$ – $12^{\circ}$ ) (sl. 28). Dna korozivskih ponikva najviše su zastupljena u prve tri kategorije padina, gotovo ravnopravno s 28 %, 30 % i 31 % (sl. 25).

### 5.2.6. Vertikalna raščlanjenost reljefa

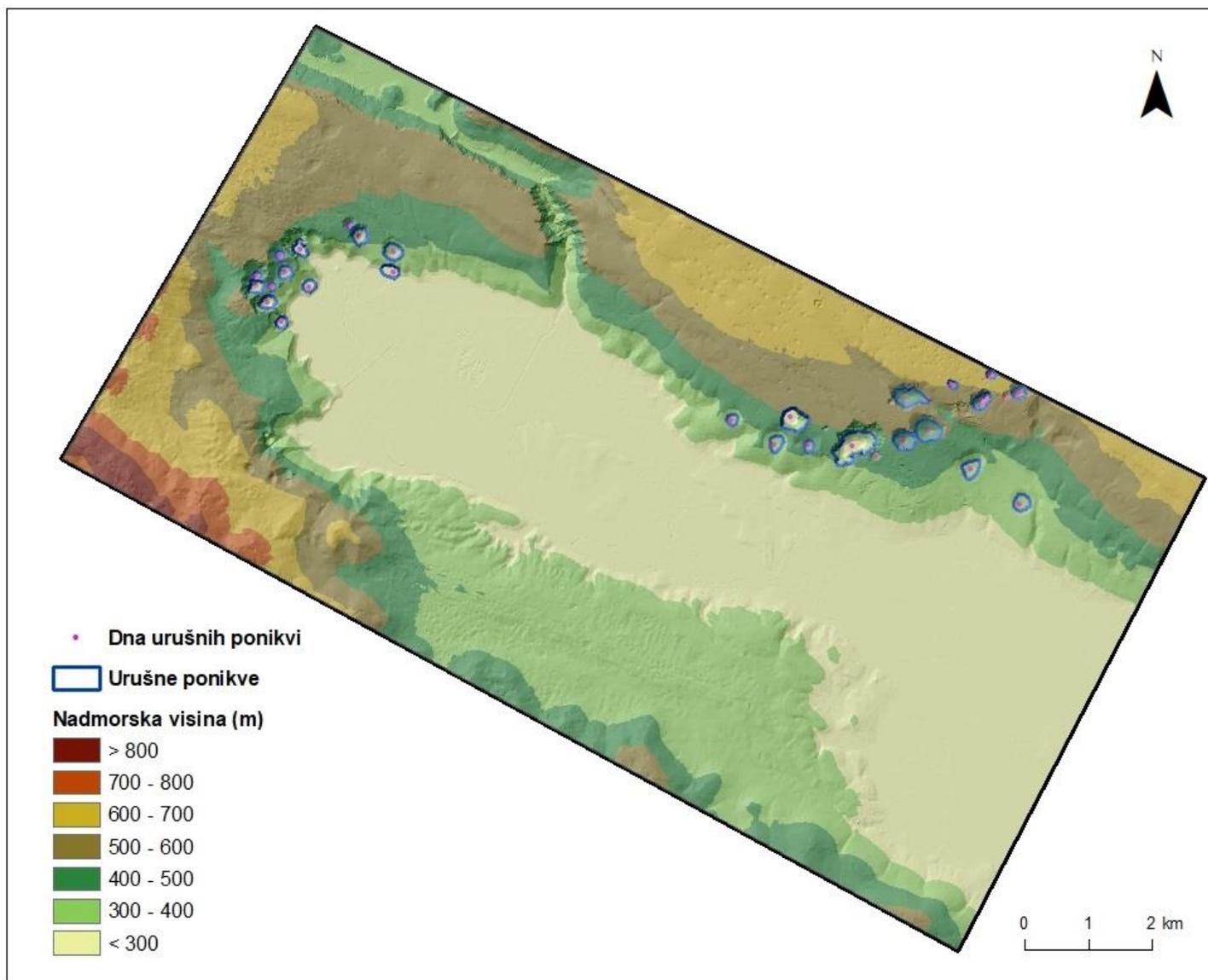
Analizom DEM-a izmjerena je minimalna raščlanjenost reljefa od 0 m/km<sup>2</sup>, a maksimalna od 263,9 m/km<sup>2</sup>. Prosječna vertikalna raščlanjenost istraživanog prostora Imotskog polja iznosi 16,35 m/km<sup>2</sup> što prema standardnoj raspodjeli vertikalne raščlanjenosti za područje Hrvatske (Lozić, 1995) smješta ovo područje u kategoriju slabo raščlanjene ravnice.

Na istraživanom području prisutno je samo četiri od šest standardnih kategorija vertikalne raščlanjenosti reljefa (sl. 29): zaravnjeni reljef (0–5 m/km<sup>2</sup>) čini 31 % površine, slabo raščlanjene ravnice (5–30 m/km<sup>2</sup>) zauzimaju više od pola površine istraživanog područja s 52 %, slabo raščlanjen reljef (30–100 m/km<sup>2</sup>) čini 16 % ukupne površine istraživanog područja dok je umjereno raščlanjen reljef (100–300 m/km<sup>2</sup>) u okviru cijelog područja površinom zanemariv, ali bitan kad promatramo urušne ponikve.

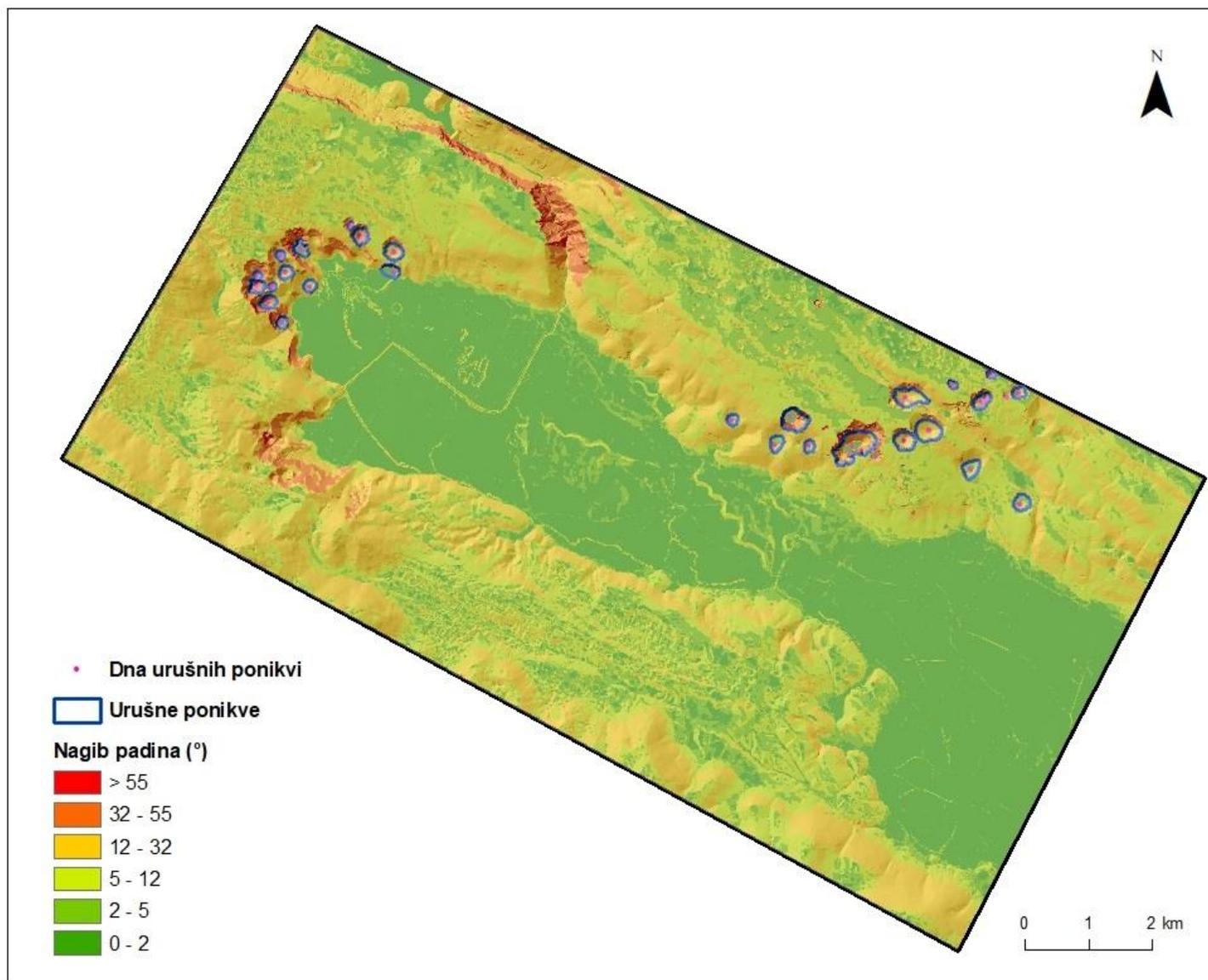


Slika 26: Distribucija kategorija vertikalne raščlanjenosti reljefa Imotskog polja te udio ponikvi i urušnih ponikvi po kategorijama

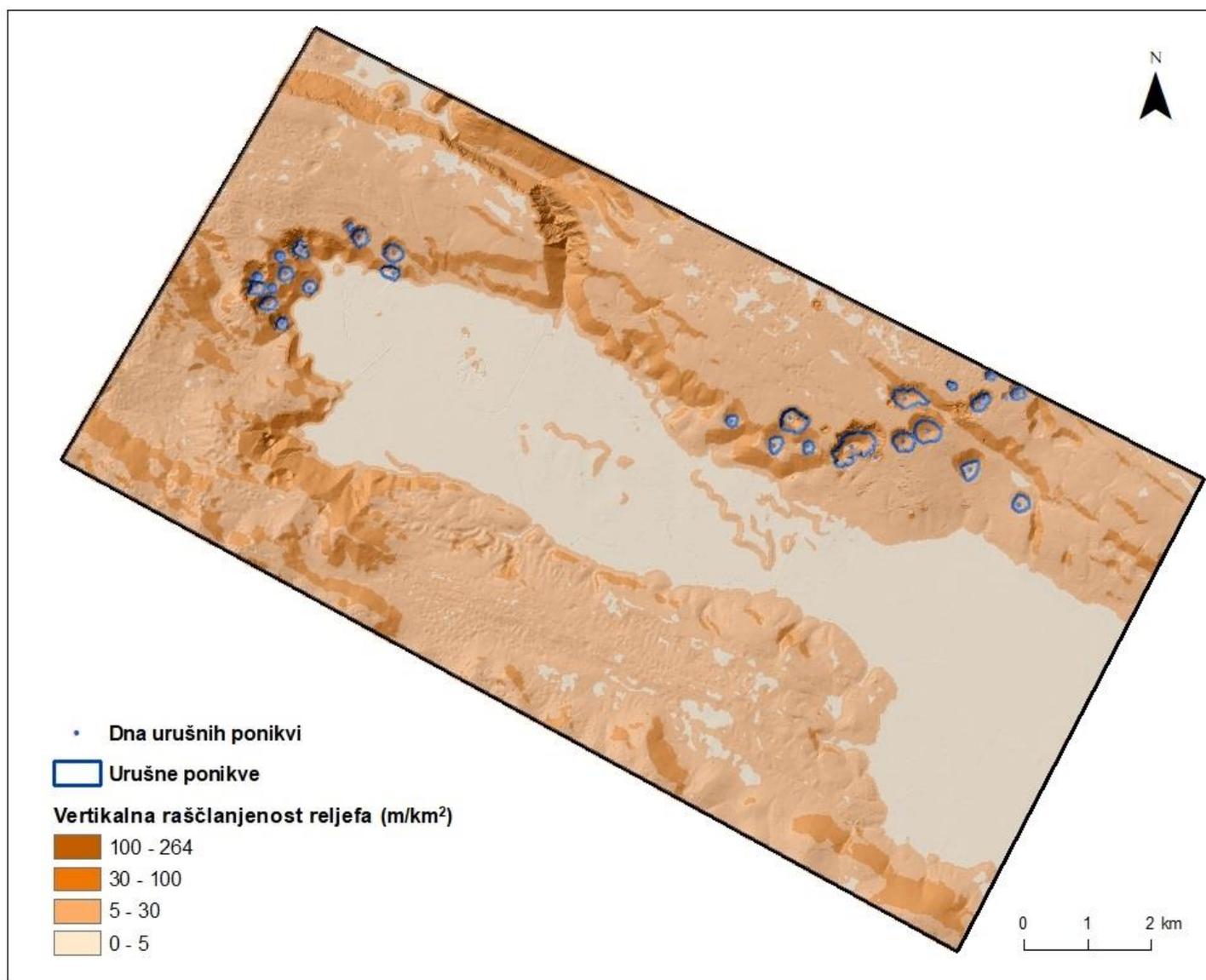
Većina se korozijskih ponikva nalazi na području raščlanjenosti 30–100 m/km<sup>2</sup>, njih 85 %, dok se dna urušnih ponikvi podjednako nalaze na područjima slabo i umjereno raščlanjenog reljefa, s 41 % ili 12 ponikva u oba razreda (sl. 26). Područja veće raščlanjenosti vezana su i za strme padine kao što su urušne ponikve ili kanjon rijeke Suvaje (sl. 29).



Slika 27: Karta prostornog rasporeda urušnih ponikvi Imotskog polja u odnosu na visinske razrede



Slika 28: Karta prostornog rasporeda urušnih ponikvi Imotskog polja u odnosu na kategorije nagiba padina



Slika 29: Karta prostornog rasporeda urušnih ponikvi Imotskog polja u odnosu na kategorije vertikalne raščlanjenosti reljefa

## 6. Usporedba ponikava

Obrađeno je sveukupno 44 urušne ponikve, u zavali Imotskog polja, 13 na području Lokvičića i 14 u široj okolici Imotskog te 17 na području Markovog polja u Lici.

Na području Markovog polja urušne se ponikve pojavljuju u vapnencima jurske starosti, podjednako u izvanredno uslojenim vapnencima donje jure kao i u dublje uslojenim vapnenacima gornje jure. Na području zavale Imotskog polja prevladavaju vapnenci kredne starosti. U široj okolici Imotskog većina je urušnih ponikvi, uključujući i najveće tri ponikve, u slabo uslojenim, masivnim, gornjokrednim vapnenacima bogatim rudistnom faunom. Na području Lokvičića površinom najveće tri urušne ponikve smještene su u slabo uslojenim, masivnim, gornjokrednim vapnenacima bogatim rudistnom faunom. Ostale ponikve, površinom manje, ali dublje, nalaze se u dobro uslojenim gornjokrednim vapnencima s hondrodontama te mjestimičnim ulošcima dolomita. Područje Markovog polja kao i Imotskog nalazi se u rasjednim zonama te su uočeni rasjedi na padinama urušnih ponikava kod Imotskog i Lokvičića.

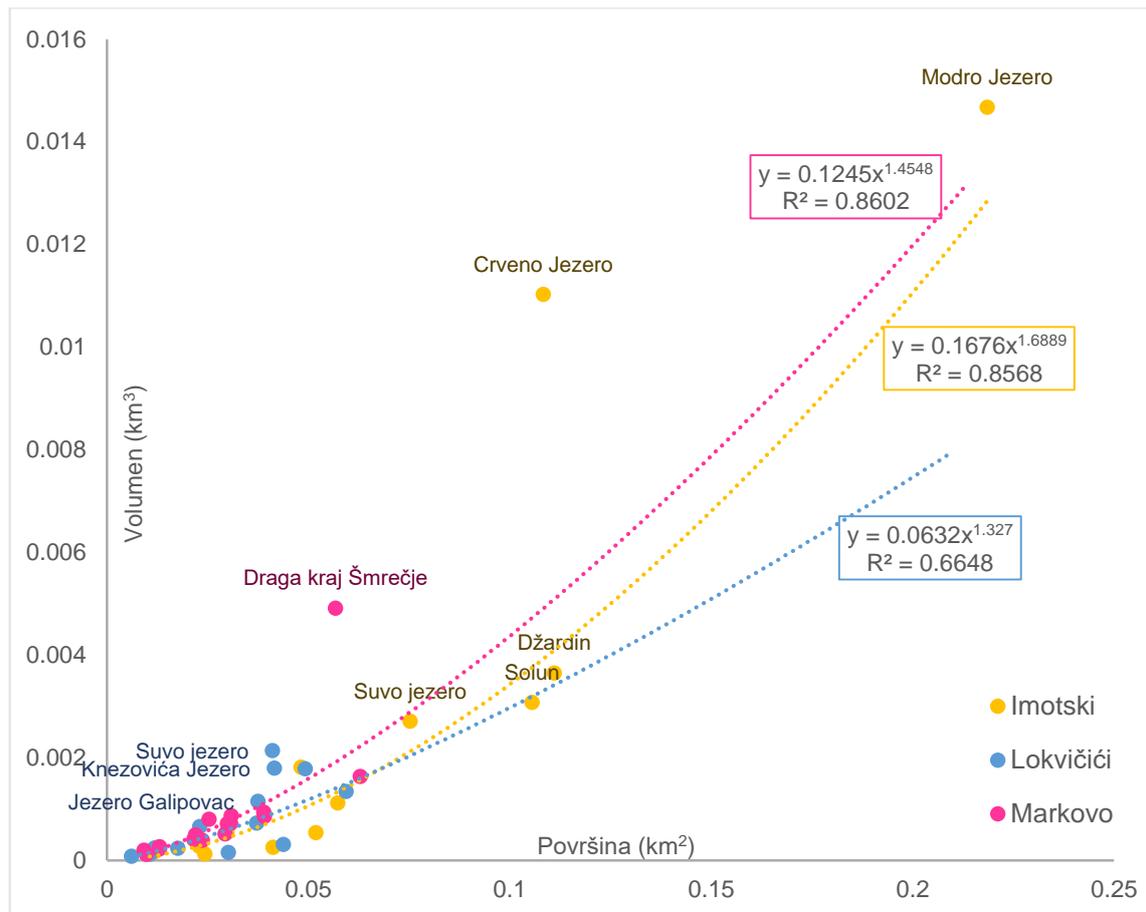
U hidrogeološkom smislu, urušne ponikve Markovog polja nalaze se iznad zone ponora, ponikve u okolici Imotskog iznad zone izvora, a ponikve na području Lokvičića u zoni izvora.

Područje Imotskog karakterizira Cfa tip klime, a područje Markovog polja Cfb-Df tip klime. Prosječna godišnja temperatura zraka za Imotski iznosi 13,7 °C, a za Gospić 8,8 °C. Prosječna godišnja količina padalina za Imotski iznosi 94,7 mm, a za Gospić 124,9 mm. Nadalje znamo da se Crveno i Modro jezero na području Imotskog napajaju krškim vodonosnikom na sjeveroistočnom dijelu sliva, gdje je količina oborina mnogo veća od oborina u Imotskom.

Prosječna vrijednost nagiba padina dna urušnih ponikvi iznosi 15,20° za Markovo Polje, 10,18° za Imotski te 3,08° za Lokvičice. Kada gledamo cijelu urušnu ponikvu, ponikava s nagibima padinama iznad 45° nema na području Markovog polja, na području Imotskog obuhvaća 14% ponikava, a na području Lokvičića 31% od svih istraživanih urušnih ponikava. Ponikve čije su padine u rasponu nagiba 32°–45° na području Markovog polja obuhvaća 65%, na području Imotskog 50%, a na području Lokvičića 31% ponikava. Ponikve čije su padine nagiba 25°–32° na području Markovog polja obuhvaća 35%, na području Imotskog 36%, a na području Lokvičića 38% urušnih ponikava.

Vrijednosti nagiba  $12^{\circ}$ – $32^{\circ}$  karakteristične su za jako nagnute terene na kojima se javlja snažna erozija, spiranje i kretanje masa, što umanjuje njihovu stabilnost. Vrlo strme terene, s nagibima  $32^{\circ}$ – $55^{\circ}$ , karakterizira destrukcija i snažno gibanje masa (Lozić, 1996). Očekivani je rezultat da u kategorijama najnižih i najviših nagiba ima najmanji broj razvijenih ponikva. Pahernik (2012) je zaključio da uzrok manjoj prosječnoj gustoći ponikava unutar kategorije zaravnjenog reljefa je taj da je ta kategorija primarno zastupljena unutar dna polja u kršu koja su najčešće i područja akumulacije velike količine kvartarnih nevezanih sedimenata koji prekrivaju starije ponikve, odnosno relativno kratko razdoblje izloženosti koroziji nije omogućilo stvaranje većeg broja udubljenja koja bi bila zabilježena unutar ekvidistance karata mjerila 1 : 25.000. Smanjenje prosječne gustoće ponikava u višim razredima nagiba padina povezano je s bržim procjeđivanjem i manjim zadržavanjem padalina i vode sniježnice na većim nagibima (Faivre, 1992) te vezom viših kategorija nagiba s aktivnim tektonskim zonama (Mihljević, 1995; Pahernik 2012).

Prosječna vrijednost područja vertikalne raščlanjenosti na kojima se nalazi dno urušne ponikve iznosi  $31,64 \text{ m/km}^2$  za Markovo Polje,  $22,7 \text{ m/km}^2$  za Imotski te  $20,7 \text{ m/km}^2$  za Lokvičiće. Padine urušnih ponikvi karakterizira veći iznos vertikalne raščlanjenost reljefa od dna ponikava i od okolnog reljefa. Relativno mala gustoća urušnih ponikava u području malih vrijednosti vertikalne raščlanjenosti reljefa veže se uz činjenicu da i same ponikve svojom dubinom pridonose raščlanjenosti tog područja (Pahernik, 2012) pa tako i padine urušnih ponikva povećavaju raščlanjenost.



Slika 30: Prikaz volumena ponikava u odnosu na površinu njihovih oboda

Pravilan porast volumena s porastom površine ukazuje na zrele ponikve s uravnoteženim padinama. Urušne ponikve mlađeg porijekla s aktivnim padina imaju veliki volumen u odnosu na manju površinu oboda. Na grafu (sl. 30) to i potvrđuju ponikve sa stalnom ili povremenom vodenom površinom kao i ponikve nazvane Suvo jezero, sugerirajući da su donedavno i one bile u kontaktu s vodonosnikom. Kod ponikva s većom površinom i manjim volumenom, ispod crte trenda, dominantan je proces denudacije.

Eksponencijalna regresija je korištena zbog pretpostavke da se povećanjem površine eksponencijalno povećava volumen ponikve.

Koeficijent determinacije  $R^2$ , dobiven regresijom, za ponikve Markovog polja iznosi  $R^2 = 0,8602$ , za ponikve u okrugu Imotskog iznosi  $R^2 = 0,8568$  te na području Lokvičića iznosi  $R^2 = 0,6648$ . Vrijednost koeficijenta determinacije  $R^2 < 0,5$  ukazuje na statistički značajnu korelaciju parametara volumena i površine urušnih ponikava.

## 7. Zaključak

Velike urušne ponikve definirane su kao sve zatvorene krške depresije koje se ističu među okolnim depresijama zbog svojih iznimnih dimenzija ili strmih ili stjenovitih padina. Geneza urušnih ponikvi povezana je s točkastim, vertikalnim odnašanjem stijena u podzemlje, bilo iznenadnim udarom, urušavanjem nad špiljskim prostorom ili postupnim mehaničkim ili korozijskim odnošenjem stijena iznad aktivnih špiljskih tunela. Velike urušne ponikve nastaju dugoročnim podrivanjem podzemnih tokova duž tektonski nestabilnih zona i izravni su pokazatelji prošlih i recentnih hidroloških uvjeta područja s razvijenim podzemnim otjecanjem.

Istraživanje urušnih ponikvi na području Markovog i Imotskog polja obuhvatilo je 44 depresije koje dimenzijama i morfologijom zadovoljavaju kriterije većih urušnih ponikava. U ovom radu nisu obuhvaćene urušne ponikve čije dimenzije ne prelaze veličinu okolnih ponikava. Takve je urušne ponikve nemoguće identificirati pomoću karata, što onemogućava sustavno proučavanje te u kasnijoj razvojnoj fazi, kada su padine ponikava uravnotežene te se ne razlikuju od okolnih ponikava, što dodatno otežava sustavno istraživanje.

Analizom općih morfometrijskih karakteristika reljefa Markovog i Imotskog polja uočena je povezanost većih nagiba padina i vertikalne raščlanjenosti reljefa s padinama urušnih ponikava od okolnog reljefa. Padine ponikava imaju nagibe iznad  $25^\circ$ , a nagibi iznad  $32^\circ$  javljaju se kod 65% ponikava u Markovom polju, 54% ponikava u okolini Imotskog te 62% ponikava u okolini Lokvičića. Za padine urušnih ponikava karakteristična je vertikalna raščlanjenost reljefa iznad  $30 \text{ m/km}^2$ . Pri prostornom planiranju. Treba obratiti pozornost na pojavu urušnih ponikvi i prepoznavanje područja sklonim urušavanju.

Iz odnosa volumena i površine ponikava, mogu se podijeliti u tri grupe prema starosti. Mlade urušne ponikve imaju veliki volumen u odnosu na manju površinu oboda zbog aktivnih padina sa snažnim gibanjem masa. Zrele urušne ponikve imaju stabilizirane padine te se prepoznaju po pravilnom porast volumena s porastom površine. Satre urušne ponikve imaju denudirane padine, dominantni su procesi erozije te takve ponikve imaju veću površinu i manji volumen.

Urušne se ponikve nalaze u tektonski nestabilnim zonama, uz rasjede i veće pukotine, ali bi za daljnja istraživanja trebale hidrogeološke karte za bolje razumijevanje otjecanja podzemnih voda te provesti dodatna terenska istraživanja.

## 8. Literatura i izvori

- Andrić, I., Bonacci, O., Jukić, B., 2013: Rezultati najnovijih hidroloških i geomorfoloških istraživanja Crvenog jezera kod Imotskog, *Hrvatske vode* 21, 344–348.
- Andrić, I., Bonacci, O., 2014: Morphological study of Red lake in Dinaric karst based on terrestrial laser scanning and sonar systems, *Acta carsologica* 43, 229–239. doi:10.3986/ac.v43i2.712
- Andrić, I., Bonacci, O., Jukić, B. 2017: Hidrološka mjerenja na Crvenom jezeru u razdoblju od 28. rujna 2013. do 10. rujna 2015, *Hrvatske vode* 25, 255–260. Preuzeto s <https://hrcak.srce.hr/192554>
- Bahun, S., 1991: O postanku Crvenog i Modrog jezera kod Imotskog, *Geološki Vjesnik* 44, 275–280.
- Bakšić, D. 2003: Speleološka istraživanja Markovog ponora 1999. i 2000. godine, *Subterranea Croatica* 1, 23–26. Preuzeto s <https://hrcak.srce.hr/216884>
- Bauer, B., 1934/35: Über die Landformen des Nördlichen Velebit, *Jahresberichte des Bundes-Real-gymnasium Knittelfeld*, 49 str.
- Bočić, N., Buzjak, N., Faivre, S., Pahernik, M., Vidović, V., Kovač, M., 2012: Temeljna geomorfološka obilježja i geoekološko vrednovanje reljefa sjevernog Velebita, u: *Znanstveno-stručni skup "Posebne vrijednosti dubokog krša": zbornik sažetaka* (ur. Buzjak, N., Paar, D.), Krasno, 21.–22. travnja 2012., Speleološko društvo Velebit i PDS Velebit, Speleološki klub Samobor, 6–6.
- Bočić, N., Pahernik, M., Bognar, A., 2010: Geomorfološka obilježja Slunjske zaravni, *Hrvatski geografski glasnik* 72, 5–23. doi:10.21861/hgg.2010.72.02.01
- Bočić, N., Pahernik, M., 2011: Ponikve Parka prirode Biokovo – prostorna analiza, u: *Znanstveno-stručni skup „Biokovo na razmeđu milenija: razvoj parka prirode u 21. stoljeću“: knjiga sažetaka* (ur. Protrka, K., Škrabić, H., Srzić, S.), Makarska, 17.–19. studeni 2011., Javna ustanova „Park prirode Biokovo“, Makarska, 68–68. Preuzeto s <https://pp-biokovo.hr/cms/clients/1/documents/114.pdf>
- Bočić, N., Pahernik, M., Maradin, M., 2016: Temeljna geomorfološka obilježja Karlovačke županije, *Prirodoslovlje* 16, 153–172.

- Bočić, N., Pahernik, M., 2017: Geomorfologija sjevernog Velebita i nove spoznaje o geomorfološkim tragovima pleistocenske glacijacije, u: *Znanstveno-stručni skup "Od istraživanja k dobrom upravljanju Nacionalnim parkom Sjeverni Velebit": zbornik sažetaka* (ur. Krušić Tomaić, I., Lupret-Obradović, S., Šilić, T.), Krasno, 24.–25. svibnja 2017., Javna ustanova „Nacionalni park Sjeverni Velebit“, Krasno, 14–15.
- Bočić, N., Pahernik, M., Faivre, S., 2019: Geomorfološka obilježja Sjevernog Velebita, *Senjski Zbornik* 46, 5–36. doi:10.31953/sz.46.1.1
- Bognar, A., 2001: Geomorfološka regionalizacija Hrvatske, *Acta Geographica Croatica* 34, 7–29. Preuzeto s <https://hrcak.srce.hr/84572>
- Bognar, A., Faivre, S., Buzjak, N., Pahernik, M., Bočić, N., 2012: Recent landform evolution in the Dinaric and Pannonian Region of Croatia, u: *Recent Landform Evolution, The Carpatho-Balkan-Dinaric Region: zbornik radova* (ur. Lóczy, D., Stankoviansky, M., Kotarba, A.), *Springer*, Dordrecht, 313–344. doi:10.1007/978-94-007-2448-8
- Bögli A., 1980: Karst Hydrology and Physical Speleology, *Springer*, Berlin, 284 str.
- Bojanić, L., Ivičić, D., Batić, V., 1981: Hidrogeologija Imotskog polja s osvrtom na značaj u regionalnom smislu. *Geološki Vjesnik* 34, 127–135.
- Bonacci, O. 2006: Crveno i Modro jezero kod Imotskog, *Hrvatske vode* 14, 45–5.
- Bonacci, O., Andrić, I., Yamashiki, Y., 2014: Hydrology of Blue Lake in the Dinaric karst, *Hydrological Processes* 28, 1890–1898. doi:10.1002/hyp.9736
- Bonacci, O., Roje-Bonacci, T., 2000: Interpretation of groundwater level monitoring results in karst aquifers: examples from the Dinaric karst, *Hydrological Processes* 14, 2423–2438.
- Bonacci, O., Roje-Bonacci, T., 2006: Zatvorene udubine u kršu i njihova uloga u kretanju vode (II.), *Hrvatska vodoprivreda* 15, 38–45.
- Božičević, S., 1968: Hidrogeologija glavnih ponora rijeke Like, *Geološki vjesnik* 21, 317–328.
- Božičević, S., 1971: Da li je Crveno jezero kod Imotskog naša najdublja jama, *Priroda* 58, 188.
- Božičević, S., 1983: Priroda graditelj – Urušenje u kršu, *Priroda* 80, 238–240.

- Bedek, J., Horvatović, M., Karaman, I. M., 2017: A new troglobiotic species, *Alpioniscus* (Illyrionethes) iapodicus n. sp. (Crustacea: Oniscidea: Trichoniscidae), from Lika region, Croatia, *Natura Croatica* 26, 205–214. doi:10.20302/NC.2017.26.17
- Buzjak, N., 2000: Collapse Structures as a Connection Between the Karst Surface and Underground (Examples from Croatia), *Acta Carsologica* 29, 65–81. doi:10.3986/ac.v29i2.449
- Buzjak, N., 2006: Geomorfološke i speleomorfološke značajke Žumberačke gore i geokološko vrednovanje endokrškog reljefa, Doktorska disertacija, *Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet*, Zagreb, 200 str.
- Buzjak, N., Bočić, N., Kvetek, F., 2017: Georaznolikost i geobaština NP Sjeverni Velebit, u: *Znanstveno-stručni skup "Od istraživanja k dobrom upravljanju Nacionalnim parkom Sjeverni Velebit": zbornik sažetaka* (ur. Krušić Tomaić, I., Lupret-Obradović, S., Šilić, T.), Krasno, 24.–25. svibnja 2017., Javna ustanova „Nacionalni park Sjeverni Velebit“, Krasno, 16–17.
- Buzjak, N., Buzjak, S., Orešić, D., 2011: Florističke, mikroklimatske i geomorfološke značajke ponikve Japage na Žumberku (Hrvatska), *Šumarski List* 3–4, 127–137. Preuzeto s <https://hrcak.srce.hr/67621>
- Cukrov, M., 2006: Fauna Crvenog jezera, *Subterranea Croatica* 6, 23–27.
- Cvijić, J., 1893: Das Karstphaenomen – Versuch einer morphologischen Monographie, *Geographischen Abhandlung* 5, 218–329.
- Cvijić, J., 1926: Geomorfologija 2, *Srpska Akademija Nauka i Umetnosti*, Beograd, 587 str.
- Čar, J., 2001: Structural bases for shaping of dolines, *Acta Carsologica* 30, 239–256. Preuzeto s <http://www.dlib.si/?URN=URN:NBN:SI:doc-1BJRIOXZ>
- Daneš, J. V., 1905: Úvodi dolni Neretvy, *Geomorphologická Studie* 8, Prague, 108 str.
- Dragičević, I., Prelogović, E., Kuk, V., Buljan, R., 1999: Recent Tectonic Activity in the Imotsko Polje Area, *Geologica Croatica* 52, 191–196. Preuzeto s <https://hrcak.srce.hr/3884>
- Dreybrodt, W., 1988: Processes in Karst Systems: Physics, Chemistry, and Geology, *Springer*, New York, Berlin, 274 str.

- Faivre, S., 1992: Analiza gustoće ponikava na Sjevernom Velebitu i Senjskom bilu, *Senjski zbornik* 19, 13–24. Preuzeto s <https://hrcak.srce.hr/73913>
- Faivre, S., 1994: Strukturno-geomorfološka analiza tipova dolinske mreže Sjevernog Velebita i Senjskog bila, *Senjski zbornik* 21, 9–24. Preuzeto s <https://hrcak.srce.hr/72711>
- Faivre, S., 1996: Neke temeljne strukturno-geomorfološke značajke sjevernog Velebita i Senjskog bila, u: *1. hrvatski geografski kongres“ Geografija u funkciji razvoja Hrvatske“: zbornik radova* (ur. Pepeonik, Z.), Zagreb, 12.–13. listopada 1995., Hrvatsko geografsko društvo, Zagreb, 156–169.
- Faivre, S., 1999: Landforms and tectonics of the Velebit mountain range (Outer Dinarides, Croatia), Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb, 360 str.
- Faivre, S., Bognar, A., 2013: Istraživanja geomorfoloških tragova pleistocenske oledbe na sjevernom i srednjem Velebitu, *Senjski zbornik* 40, 711–714. Preuzeto s <https://hrcak.srce.hr/129854>
- Faivre, S., Pahernik, M., 2007: Structural influences on the spatial distribution of dolines, Island of Brač, Croatia, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 51, 487–503. doi:10.1127/0372-8854/2007/0051-0487
- 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. Preuzeto s [https://www.persee.fr/doc/morfo\\_1266-5304\\_1999\\_num\\_5\\_2\\_983](https://www.persee.fr/doc/morfo_1266-5304_1999_num_5_2_983)
- Faivre, S., Reiffsteck, P., 2002: From doline distribution to tectonic movements example of the Velebit mountain range, Croatia, *Acta Carsologica* 31, 139–154. doi:10.3986/ac.v31i3.384
- Ford, D. Williams, P., 2007: Karst hydrogeology and geomorphology, *John Wiley & Sons*, West Sussex, England, 562 str. doi:10.1002/9781118684986
- Gabrovšek, F., Stepišnik, U., 2011: On the formation of collapse dolines: A modelling perspective, *Geomorphology* 134, 23–31. doi:10.1016/j.geomorph.2011.06.007
- Gams, I., 2000: Doline morphogenetic processes from global and local viewpoints, *Acta Carsologica* 29, 123–138. doi:10.3986/ac.v29i2.453

- Gams, I., 2005: Tectonics impact on poljes and minor basins (case studies of Dinaric karst), *Acta Carsologica* 34, 25–41. doi:10.3986/ac.v34i1.277
- Garašić, M., 2000: Speleolohidrogeološka istraživanja Crvenog jezera kraj Imotskog u Dinarskom kršu (Hrvatska), u: 2. *hrvatski geološki kongres: zbornik radova* (ur. Vlahović, I., Biondić, R.), Cavtat – Dubrovnik, 17.–20. svibnja 2000., Institut za geološka istraživanja, Zagreb, 587–590.
- Garašić, M., 2012: Crveno jezero – the biggest sinkhole in Dinaric Karst (Croatia), u: *EGU General Assembly 2012, Geophysical Research Abstracts 14: knjiga sažetaka*, Beč, 22.–27. travnja 2012., Copernicus, Beč, 1–3.
- Gavazzi, A., 1903/04: Die Seen des Karstes, *Abhandlungen der K. K. Geographischen Gesellschaft* 5, Lechner, Vienna, 136 str.
- Grund, A., 1903: Die Karsthydrographie, Studiums aus Westbosnien, *Geographischen Abhandlungen* 7, Leipzig, 201 str.
- Hiller, T., Romanov, D., Gabrovšek, F., Kaufmann, G., 2014: The creation of collapse doline, A 3D modelling approach, *Acta Carsologica* 43, 241–255. doi:10.3986/ac.v43i2.832
- Holjević, D., 1997: Poplave u Lipovom polju, *Hrvatska vodoprivreda* 52, 28–29.
- Ivkić, I., Ilijanić, N., Miko, S., Hajek Tadesse, V., Hasan, O., Navratil, D., Barudžija, U., 2019: Preliminary paleolimnological and geomorphological research of the Prološko blato area in Imotsko polje, u: 6. *hrvatski geološki kongres s međunarodnim sudjelovanjem: knjiga sažetaka* (ur: Horvat, M., Matoš, B. i Wacha, L.), Zagreb, 9.–12. listopada 2019., Hrvatski geološki institut, Zagreb, 93–93.
- Jalžić, B., Bedek, J., Bilandžija, H., Bregović, P., Cvitanović, H., Čuković, T., Čukušić, A., Dražina, T., Đud, L., Gottstein, S., 2013: Atlas špiljskih tipskih lokaliteta faune Republike Hrvatske, svezak 2. Zagreb, Hrvatsko biospeleološko društvo.
- Jennings, J. N., 1975: Doline morphometry as a morphogenetic tool: New Zealand examples, *New Zealand geographer* 31, 6–28. doi.org:10.1111/j.1745-7939.1975.tb00793.x
- Kaufmann, G., 2014: Geophysical mapping of solution and collapse sinkholes, *Journal of Applied Geophysics* 111, 271–288. doi:10.1016/j.jappgeo.2014.10.011.

- Kovačević, T., 1999: Crveno jezero – Imotski, *Hrvatska Vodoprivreda* 8, 43–46.
- Kožar, L., 2020: Morfometrijska analiza krških reljefnih oblika temeljena na LiDAR-skim podacima – primjer NP Plitvička jezera, Diplomski rad, *Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet*, Zagreb, 53 str.
- Kunaver, P., 1959/60: Modro in Rdeče jezero pri Imotskem, *Proteus* 22, 14–18.
- Lozić, S., 1995: Vertikalna raščlanjenost reljefa kopnenog dijela Republike Hrvatske, *Acta Geographica Croatica* 30, 17–28. Preuzeto s <https://hrcak.srce.hr/84498>
- Lozić, S., 1996: Nagibi padina kopnenog dijela Republike Hrvatske, *Acta Geographica Croatica* 31, 41–49. Preuzeto s <https://hrcak.srce.hr/84510>
- Milanović, P. T., 1981: Karst Hydrogeology, *Water Resources Publications*, Littleton. 434 str.
- Marković, J., Bočić, N., Pahernik, M., 2016: Prostorni raspored i gustoća ponikava jugoistočnog Velebita, *Goadria* 21, 1–28. doi:10.15291/goadria.23
- Maršić, M., 2011: Geomorfološka analiza ponikava šireg područja Imotskog polja, Diplomski rad, *Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet*, Zagreb, 65 str.
- Mihljević, D., 1995: Geomorfološke značajke gorskog hrpta Učke gorske skupine Ćićarije i Istarskog pobrđa, Doktorska disertacija, *Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet*, Zagreb, 377 str.
- Ozimec, R., 1999: Crveno jezero – Imotsko oko, *Hrvatski Zemljopis* 41, 16–20.
- Ozimec, R., Jalžić, B., Jelić, D., 2017: Preliminarni izvještaj prirodoslovnih istraživanja u okviru Speleoroničke ekspedicije Crveno jezero 2017, *Subterranea Croatica* 23, 34–41. Preuzeto s <https://hrcak.srce.hr/197121>
- Pahernik, M., 2000: Prostorni raspored i gustoća ponikava SZ dijela Velike Kapele – rezultati računalne analize susjedstva, *Goadria* 5, 105–120. doi:10.15291/goadria.156
- Pahernik, M., 2005: Geomorfologija Gorskog Kotara-primjena geografsko informacijskog sustava u istraživanju reljefa, Doktorska disertacija, *Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet*, Zagreb, 378 str.

- Pahernik, M., 2012: Prostorna gustoća ponikava na području Republike Hrvatske; *Hrvatski geografski glasnik* 74, 5–26. doi:10.21861/HGG.2012.74.02.01
- Perica, D., 1998: Geomorfologija krša Velebita, Doktorska disertacija, *Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb*, 220 str.
- Petrik, M., 1960: Hidrografska mjerenja u okolici Imotskog, *Ljetopis JAZU* 64, 266–286.
- Prelogović, E., 1989: Neotectonic movements in the Northern part of Mt. Velebit and part of Lika (SW Croatia), *Geološki vjesnik* 42, 133–147.
- Radoš, D., 2012: Prikaz knjige, *Geoadria* 17, 113–114. doi:10.15291/geoadria.240
- Roglić, J., 1938: Imotsko Polje, Fizičko-geografske osobine, *Posebno Izdanje Geografskog Društva* 21, Beograd, 125 str.
- Roglić, J., 1954: Polja zapadne Bosne i Hercegovine, u: *Treći kongres geografa Jugoslavije: zbornik radova* (ur. Kanaet, T.), Sarajevo, 14.–23. rujna 1953., Geografsko društvo NR BiH, Sarajevo.
- Roglić, J., 1974: Prilog hrvatskoj krškoj terminologiji, *Krš Jugoslavije* 9, 1–69.
- Romanov, D., Kaufmann, G., Al-Halbouni, D., 2020: Basic processes and factors determining the evolution of collapse sinkholes—A sensitivity study, *Engineering Geology* 270, 1–19. doi:10.1016/j.enggeo.2020.105589.
- Santo, A., Ascione, A., del Prete, S., di Crescenzo, G., Santangelo, N., 2011: Collapse sinkholes distribution in the carbonate massifs of central and southern Apennines. *Acta Carsologica* 40, 95–112. doi:10.3986/ac.v40i1.31.
- Sauro, U., 2003: Dolines and sinkholes: Aspects of evolution and problems of classification, *Acta Carsologica* 32, 41–52. doi:10.3986/ac.v32i2.335
- Slišković, I., Ivičić, D., 2001: Nove spoznaje o slivu Imotskog polja, *Hrvatske vode* 35, 177–185.
- Stepišnik, U., 2008: The Application of Electrical Resistivity Imaging in Collapse Doline Floors :Divača Karst, Slovenia, *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica* 42, 41–51.
- Stepišnik, U., 2010: Udornice v Sloveniji, *E-GeograFF* 1, 118 str. doi:10.4312/9789612379841.

- Stepišnik, U., 2014: Japage: Udornice na kupreškem Polju, Bosna in Hercegovina, *Dela* 42, 5–20. doi:10.4312/dela.42.1.5-20.
- Stepišnik, U., 2015: Krasno polje na Velebitu: morfografske i morfogenetske karakteristike, *Hrvatski geografski glasnik* 77, 85–99. doi:10.21861/HGG.2015.77.02.05
- Stepišnik, U., Stojilković, B., Hočevan, G., 2018: Geomorfološke značilnosti Severnega Velebita, *E-GeograFF* 11, 21–43. doi:10.4312/9789610601470
- Stepišnik, U., Grlj, A., 2018: Caves, denuded caves and collapse dolines as past hydrological pattern indicators of the grabovica plateau, the Dinaric karst (Bosnia and Herzegovina), *Dela* 49, 95–111. doi:10.4312/dela.49.95-111
- Stroj, A., 2010: Podzemni tokovi u zaleđu krških priobalnih izvora na području Velebitskog kanala, Doktorska disertacija, *Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet*, Zagreb, 259 str.
- Šegota, T., Filipčić, A., 1996: Klimatologija za geografe, *Sveučilište u Zagrebu, Školska knjiga*, Zagreb, 471 str.
- Šegota, T., Filipčić, A., 2003: Köppenova podjela klima i hrvatsko nazivlje, *Geoadria* 8, 17–37. doi:10.15291/geoadria.93
- Šušteršič, F., 1983: Preprost model preoblikovanja udornic (A simple model of the collapse dolines transformation), *Acta Carsologica* 12, 109–138.
- Šušteršič, F., 2000: Are “Collapse Dolines” Formed Only by Collapse?, *Acta Carsologica* 29, 213–230. doi:10.3986/ac.v29i2.461
- Ujević, A., 1951: Vijesti, *Hrvatski geografski glasnik* 13, 183–222. Preuzeto s <https://hrcak.srce.hr/56368>
- Ujević, A., 1957: Vijesti, *Hrvatski geografski glasnik* 19, 245–250. Preuzeto s <https://hrcak.srce.hr/56288>
- Vrbanac, B., 2013: Pojmovnik fenomena krša, *Nafta* 64, 64–76. Preuzeto s <https://hrcak.srce.hr/107159>
- Waltham, T., Bell, F. G., Culshaw, M., 2005: Sinkholes and subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction, *Springer Praxis Publishing*, Chichester, 384 str.

Williams P., 2004: Dolines, u *Encyclopedia of Caves and Karst Science*, *Fitzroy Dearborn*, New York, 628–642.

Zdilar, S., 1999: Reljef zavale Imotskog polja i njegovo geološko vrednovanje, Magistarski rad, *Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet*, Zagreb.

Zdilar, S., 2007: Geomorfologija Biokovske podgore i zavale Imotskog polja, Doktorska disertacija, *Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet*, Zagreb.

Zdilar, S., 2015: Geomorfološka obilježja Zavale Imotskog polja i Podgorja Biokova, *Hrvatska sveučilišna naklada, Zagreb*, 170 str.

#### *Izvori:*

Bioportal, Web portal Informacijskog sustava zaštite prirode, *Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, Zavod za zaštitu okoliša i prirode*. <http://www.bioportal.hr/gis/>, (31.8.2020.)

DHMZ: Klima Hrvatske, Klimatske normale, *Državni hidrometeorološki zavod*. [https://klima.hr/k1/k1\\_2/gospic.pdf](https://klima.hr/k1/k1_2/gospic.pdf), (25.8.2020.)

Digitalni model reljefa (DEM), veličina jedinične ćelije 5 x 5 m, *Baza prostornih podataka Geografskog odsjeka Prirodoslovno matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu*.

Geoportal DGU, *Državna geodetska uprava Republike Hrvatske*. <https://geoportal.dgu.hr/#/menu/podaci-o-slojevima>, (31.8.2020.)

Geoportal DGU, *Državna geodetska uprava Republike Hrvatske*. <http://geoportal.dgu.hr/wms?layers=TK25>, (31.8.2020.)

ESRI, 2020: How To: *Create points representing the highest or lowest elevations within polygon features*, <https://support.esri.com/en/technical-article/000011761>, (1.12.2020)

ESRI, 2020: Tool Reference: *Cut Fill (Spatial Analyst)*, <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/cut-fill.htm>, (1.9.2020.)

ESRI, 2020: Tool Reference: *Extract Multi Values to Points (Spatial Analyst)*, <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/extract-multi-values-to-points.htm>, (1.9.2020.)

- ESRI, 2020: Tool Reference: *Fill (Spatial Analyst)*, <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/fill.htm>, (1.9.2020.)
- OpenStreetMap contributors, 2020: Planet dump retrieved from <https://planet.osm.org>,  
Preuzeto s <https://www.openstreetmap.org>
- Raić, V., Ahac, A., Papeš, J., 1977: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, List Imotski L33–23, *Institut za geološka istraživanja*, Sarajevo, 1962–1967; *Savezni geološki institut*, Beograd.
- Raić, V., Ahac, A., Papeš, J., 1978: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, Tumač za list Imotski L33–23, *Institut za geološka istraživanja*, Sarajevo 1968; *Savezni geološki institut*, Beograd, 51 str.
- Sokač, B., Bahun, S., Velić, I., Galović, I., 1976: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, Tumač za list Otočac L33–115, *Institut za geološka istraživanja*, Zagreb 1970; *Savezni geološki institut*, Beograd, 44 str.
- Topografske karte mjerila 1:25 000: listovi 419-1-3 (Gospić), 419-1-4 (Gospić), 419-3-2 (Gospić), 573-1-1 (Makarska), 573-1-2 (Makarska), 573-2-1 (Makarska), *Vojnogeografski institut*, Beograd, 1977.–1979.
- Velić, I., Bahun, S., Sokač, B., Galović, I., 1974: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, List Otočac L33–115, *Institut za geološka istraživanja*, Zagreb, 1970; *Savezni geološki institut*, Beograd.

## 9. Prilozi

### *Popis slika*

Slika 1: Glavni tipovi ponikava prema Sauro (2003), preuzeto iz Bonacci i Roje-Bonacci (2006), prilagođeno

Slika 2: Urušna ponikva prema Cvijić (1893), preuzeto iz Stepišnik (2010)

Slika 3: Mlada i stara urušna ponikva, preuzeto iz Jennings (1975), prilagođeno

Slika 4: Položaj istraživanog područja Markovo polje (OpenStreetMap contributors, 2020)

Slika 5: Godišnji hod temperature zraka i količine padalina u klimatološkoj postaji Gospić, 1971.–2000.

Slika 6: Klima dijagram po godišnjim dobima za Gospić u razdoblju 1971.–2000. godine

Slika 7: Položaj istraživanog područja Imotsko polje (OpenStreetMap contributors, 2020)

Slika 8: Godišnji hod temperature zraka i količine padalina u klimatološkoj postaji Imotski, 1981.–2001.

Slika 9: Klima dijagram po godišnjim dobima za Imotski u razdoblju 1981.–2001. godine

Slika 10: Princip rada alata *Fill* i *Cut Fill*

Slika 11: Urušne ponikve Markovog polja

Slika 12: Karta prostornog rasporeda ponikava i gustoće ponikvi Markovog polja

Slika 13: Prostorni raspored urušnih ponikva Markovog polja na geološkoj karti (Velić i dr., 1974)

Slika 14: Distribucija hipsometrijskih razreda Markovog polja te udio ponikvi i urušnih ponikvi po razredima

Slika 15: Distribucija kategorija nagiba padina Markovog polja te udio ponikvi i urušnih ponikvi po kategorijama

Slika 16: Distribucija kategorija vertikalne raščlanjenosti reljefa Markovog polja područja te udio ponikvi i urušnih ponikvi po kategorijama

Slika 17: Karta prostornog rasporeda urušnih ponikvi Markovog polja u odnosu na visinske razrede

- Slika 18: Karta prostornog rasporeda urušnih ponikvi Markovog polja u odnosu na kategorije nagiba padina
- Slika 19: Karta prostornog rasporeda urušnih ponikvi Markovog polja u odnosu na kategorije vertikalne raščlanjenosti reljefa
- Slika 20: Urušne ponikve na širem području Imotskog
- Slika 21: Urušne ponikve na području Lokvičića
- Slika 22: Karta prostornog rasporeda ponikava i gustoće ponikvi Imotskog polja
- Slika 23: Prostorni raspored urušnih ponikva Imotskog polja na geološkoj karti (Raić i dr., 1977)
- Slika 24: Distribucija hipsometrijskih razreda Imotskog polja te udio ponikvi i urušnih ponikvi po razredima
- Slika 25: Distribucija kategorija nagiba padina Imotskog polja te udio ponikvi i urušnih ponikvi po kategorijama
- Slika 26: Distribucija kategorija vertikalne raščlanjenosti reljefa Imotskog polja te udio ponikvi i urušnih ponikvi po kategorijama
- Slika 27: Karta prostornog rasporeda urušnih ponikvi Imotskog polja u odnosu na visinske razrede
- Slika 28: Karta prostornog rasporeda urušnih ponikvi Imotskog polja u odnosu na kategorije nagiba padina
- Slika 29: Karta prostornog rasporeda urušnih ponikvi Imotskog polja u odnosu na kategorije vertikalne raščlanjenosti reljefa
- Slika 30: Prikaz volumena ponikava u odnosu na površinu

## *Popis tablica*

Tablica 1: Temperature zraka u °C u Gospiću po mjesecima za razdoblje 1971.–2000. godine (DHMZ)

Tablica 2: Padaline u mm u Gospiću po mjesecima za razdoblje 1971.–2000. godine (DHMZ)

Tablica 3: Temperature zraka u °C i količina padalina u mm u Gospiću po godišnjim dobima za razdoblje 1971.–2000. godine (DHMZ)

Tablica 4: Temperature zraka u °C u Imotskom po mjesecima za razdoblje 1981.–2001. godine (DHMZ)

Tablica 5: Padaline u mm u Imotskom po mjesecima za razdoblje 1981.–2001. godine (DHMZ)

Tablica 6: Temperature zraka u °C i količina padalina u mm u Imotskom po godišnjim dobima za razdoblje 1981.–2001. godine (DHMZ)

Tablica 7: Definirani razredi gustoće ponikva (Pahernik, 2012)

Tablica 8: Dubine, površine i volumeni urušnih ponikva Markovog polja te morfometrijska obilježja točaka u kojima su zabilježena njihova dna

Tablica 9: Dubine, površine i volumeni urušnih ponikva na širem području Imotskog te morfometrijska obilježja točaka u kojima su zabilježena njihova dna

Tablica 10: Dubine, površine i volumeni urušnih ponikva na području Lokvičića te morfometrijska obilježja točaka u kojima su zabilježena njihova dna