

Hidrološka i geomorfološka obilježja izvora prisojne strane Parka prirode Medvednica

Martinić, Ivan

Doctoral thesis / Disertacija

2024

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:217:153228>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**



Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet

Geografski odsjek

Ivan Martinić

**HIDROLOŠKA I GEOMORFOLOŠKA
OBILJEŽJA IZVORA PRISOJNE STRANE
PARKA PRIRODE MEDVEDNICA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geografski odsjek

Ivan Martinić

**HIDROLOŠKA I GEOMORFOLOŠKA
OBILJEŽJA IZVORA PRISOJNE STRANE
PARKA PRIRODE MEDVEDNICA**

DOKTORSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čanjevac

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

University of Zagreb

Faculty of Science

Department of Geography

Ivan Martinić

**HYDROLOGICAL AND
GEOMORPHOLOGICAL
CHARACTERISTICS OF SPRINGS ON THE
SOUTH SIDE OF THE MEDVEDNICA
NATURE PARK**

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor:

Ivan Čanjevac, PhD, Associate Professor

Zagreb, 2024

Životopis mentora - izv. prof. dr. sc. Ivan Čanjevac

Rođen je 1980. godine u Zagrebu, gdje je završio osnovnu i srednju školu te 2005. godine diplomirao studij geografije na Geografskom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu s odličnim uspjehom. Godine 2006. upisao je poslijediplomski doktorski studij *Geografske osnove prostornog planiranja i uređenja* te doktorirao 2012. godine s temom *Tipologija i promjene režima protoka rijeka u Hrvatskoj* (mentori: prof. dr. sc. Danijel Orešić i prof. dr. sc. Ognjen Bonacci). Tijekom (2011.) i nakon doktorskog studija (2014./2015.) usavršavao se na *Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiver Wasserbau (IWHW), Universität für Bodenkultur Wien*, Austrija u ukupnom trajanju od petnaest (15) mjeseci.

Od 2006. zaposlen je na Geografskom odsjeku PMF-a u Zavodu za fizičku geografiju kao znanstveni novak i asistent, od 2013. kao viši asistent, od 2016. kao docent, a 2023. izabran je u znanstveno-nastavno zvanje izvanrednog profesora.

Kao znanstveni novak radio je na nekoliko istraživačkih projekata u području hidrogeografije i geomorfologije, a nakon izbora u docenta (su)vodio je i sudjelovao u više međunarodnih i domaćih znanstvenih i stručnih projekata. Vodio je i infrastrukturni projekt *PMF-Geografski odsjek, Marulićev trg 19 – program provedbe mjera cjelovite obnove infrastrukture i opreme oštećene potresom (grupa 1 i 4) (FSEU.2021.MZO.035)* financiran iz Fonda solidarnosti EU.

Znanstveni rad usmjeren mu je na dva glavna područja. Prvo je proučavanje utjecaja klimatskih promjena i čovjeka na protočni režim rijeka i njegove komponente, posebice visoke vode. Drugo područje interesa je međuodnos vode i reljefa kroz hidromorfološka istraživanja tekućica i stajaćica u kontekstu određivanja i praćenja ekološkog stanja voda sukladno Okvirnoj direktivi o vodama EU. Objavio je 25 znanstvenih radova, uključujući radove u časopisima *Science* i *Nature* koji su prema WoS-u ukupno citirani više od 1000 puta.

Trenutno na Geografskom odsjeku PMF-a vodi kolegije *Hidrologija, Primijenjena hidrogeografija, Prirodni rizici i Prirodna osnova u prostornom planiranju* (trećina kolegija) te *terensku nastavu*. Na *Doktorskom studiju geografije: prostor, regija, okoliš, pejzaž* sunositelj je kolegija *Metodologija istraživanja 2*. Mentor je ili savjetnik troje studenata doktorskoga studija.

Aktivan je član Hrvatskoga geografskog društva (HGD) od 2000. godine (potpredsjednik u razdoblju 2014.-2018.; glavni urednik stručno-informativnog časopisa *Geografski horizont* 2022.-2024). U razdoblju 2012.-2019. bio je član upravnoga odbora Komisije za vode Međunarodne geografske unije. Član je Hrvatskoga hidrološkog društva i Hrvatskoga geomorfološkog društva.

Od 1. 10. 2023. bio je predstojnik Zavoda za fizičku geografiju, a od 1. 2. 2024. obnaša dužnost pročelnika Geografskog odsjeka PMF-a. Bio je član Senata Sveučilišta u Zagrebu, Vijeća prirodoslovnog područja i Fakultetskog vijeća PMF-a u razdoblju 2009.-2013. (ponovno član od 2023.). Od 2019. do 2022. bio je koordinator PMF-a za Festival znanosti a 2024. koordinator Geografskog odsjeka za manifestaciju Dan i noć na PMF-u.

Dobitnik je Dekanove nagrade za mlade znanstvenike PMF-a 2014. godine. Peterostruki je dobitnik nagrade Brdo koju dodjeljuje Studentski zbor PMF-a za najboljeg predavača na Geografskom odsjeku PMF-a prema odabiru studenata.

Zahvale

Zahvale dugujem velikom broju ljudi, koji su više ili manje dali svoj doprinos tijekom cijelog procesa ovog istraživanja i pisanja samog doktorata. Ukoliko sam nekoga izostavio iz ove zahvale neka se ne uvrijedi, nije bilo namjerno.

Prije svega želio najviše bih se zahvaliti svojem mentoru, izv. prof. dr. sc. Ivanu Čanjevcu, koji mi je pružio punu podršku tijekom svakog koraka mojeg obrazovanja u doktorskom studiju, iako sam odabrao „teži“ put. Hvala mu na svim stručnim i životnim savjetima, motivaciji i dobroj volji, kao i na pomoći na jednom dijelu terenskih istraživanjima.

Moram se posebno zahvaliti svima koji su mi pomogli u terenskom radu, koji je nije bio lagan i bio je ključan u izradi ovog doktorata. Hvala prijatelju i kolegi Karlu Vinkoviću uz kojeg je odrađen najveći dio terena u prvih godinu dana. Za njega nije bilo prestrme padine ili pregustog raslinja te su zbog njega pronađeni i oni najskrivljeniji izvori. Hvala prof. dr. sc. Nenadu Buzjaku na detaljnom terenu na prostoru Ponikava te na njegovim savjetima i pomoći. Hvala kolegi Dominiku Tomiću za odradu teških terena na području Vrapčaka. Hvala Valeriji Rossi (Butorac) i retriverici Yuki za zabavne terene na istočnom dijelu Medvednice, ali i za brojne kave i motivacijske razgovore. Hvala kolegi Juri Saboleku s kojim je odrađen najveći broj terena u zadnjoj godini istraživanja i što je imao volje ići sa mnom kada je motivacija već bila malo manja. Također hvala kolegama Damjanu Vinkoviću i Luki Razumu za nekoliko odrađenih terena pri kraju istraživanja.

Želim se zahvaliti povjerenstvu za ocjenu i obranu doktorskog rada, prof. dr. sc. Danijelu Orešiću, prof. dr. sc. Nenadu Buzjaku i dr. sc. Josipu Terziću na korisnim komentarima i sugestijama koje su ovaj rad učinile još vrijednijim i boljim.

Posebno hvala prof. dr. sc. Jeleni Parlov s RGNF-a na uloženom vremenu, vrlo korisnim savjetima i materijalima.

Zahvale idu i u Poljsku, dr. sc. Elizi Płaczekowskoj na inspiraciji i ideji za ovo istraživanje, kao i dr. sc. Bartłomieju Rzonci i dr. sc. Karolini Mostowik na stručnim savjetima i edukaciji.

Hvala Laszlu Podolszkom s HGI-a na uslužnosti i dostavi vrijednih geoloških podataka koji su mi uštedjeli puno vremena. Hvala Filipu Brletiću koji mi je nesebično dostavio vrijedne podatke svojih istraživanja izvora. Hvala prof. dr. sc. Petri Radeljak Kaufmann na savjetima vezano uz statistiku.

Hvala Ivani Erdelez i Ivani Telinec iz referade što su *hendlale* svu papirologiju vezano za doktorat i što su mi uvijek izlazile u susret prilikom nekih nejasnoća i problema.

Posebna zahvala ide svoj bivšoj i sadašnjoj ekipi iz Zdravice i kavice u Zelinskoj: Sari, Paoli, Kiki, Valentinu, Luciji, Niki, Dolores, Josipi, Danijeli, Marti, Lani, Jayu, Morisu, Veroniki, Ani (i ostalima čije ime ne znam ili sam ih zaboravio navesti). Hvala im što su me opskrbljivali kavama i što su stvorili toplu i ugodnu atmosferu u kafiću u kojem sam odradio dobar dio doktorata, posebno u vrijeme Covid-a i obnove nakon potresa kada sam bio bez ureda.

Hvala mojoj obitelji, roditeljima Tei i Saši te sestri Martini, kao i mojim prijateljima Hrvoju, Viktoru i Karlu, što su uvijek bili moja podrška na različite načine.

Hvala mom tijelu koje je izdržalo više od 100 terena bez ikakvih ozbiljnijih ozljeda i hvala dragoj Elantri što me vozila bez problema po sljemenskim cestama.

Hvala višim i neobjašnjivim silama, kako god ih zvali ili zamšljali, što su me čuvale i dale mi snage da odradim ovaj posao.

I kao šećer na kraju, posebno hvala mojoj Anamariji na ljubavi, razumijevanju i pomoći kroz cijeli ovaj proces, ali i općenito u životu. Hvala joj što se nije bunila niti na jednu subotu ili nedjelju koju sam proveo na terenu, a mogli smo ju provesti negdje drugdje zajedno. Hvala joj jer je bila moj stup podrške.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geografski odsjek

Doktorski rad

Hidrološka i geomorfološka obilježja izvora prisojne strane Parka prirode Medvednica

Ivan Martinić

Poslijediplomski sveučilišni doktorski studij Geografije

Izvadak: Na prisojnim padinama Medvednice ukupno je kartirano 900 izvora, čime je utvrđeno da je njihov broj višestruko veći od prethodno smatranog. Izdašnost izvora uglavnom je manja od 1 L/s, pri čemu je najviše izvora izdašnosti od 0,01 do 0,1 L/s. Broj izvora smanjuje se s udaljavanjem od poznatih rasjeda i kontaktnih zona. Utvrđene su razlike u broju i gustoći izvora s obzirom na litostratigrafske jedinice prostora istraživanja, pri čemu se najveći broj izvora javlja na području parametamornih stijena devonske i karbonske starosti. Najveća gustoća izvora zabilježena je na području paleogenskih konglomerata i pješčenjaka. Što se tiče morfometrijskih obilježja, izvori se najčešće javljaju na konkavnim i konvergentnim padinama, odnosno na padinama nagiba od 12° do 32°. Većini izvora određeni su tipovi, pri čemu su najzastupljeniji helokreni izvori. Praćenjem nekoliko izvora utvrđena su njihova hidrološka i fizikalno-kemijska svojstva. Zabilježen je i utjecaj tretiranja prometnica sredstvima protiv zaleđivanja na kakvoću vode.

223 stranice, 121 grafički prilog, 32 tablice, 237 bibliografskih referenci; izvornik na hrvatskom jeziku

Ključne riječi: prostorni raspored, izdašnost, kartiranje, morfometrija, fizikalno-kemijska obilježja vode

Mentor: izv. prof. dr. sc. Ivan Čanjevac

Povjerenstvo: prof. dr. sc. Danijel Orešić
prof. dr. sc. Nenad Buzjak
dr. sc. Josip Terzić

Tema prihvaćena: 19.10.2021.

Rad prihvaćen: 5.9.2024.

Datum i vrijeme obrane: 15.10.2024. u 12:00 sati

Rad je pohranjen u Središnjoj geografskoj knjižnici Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Marulićev trg 19, Zagreb, Hrvatska, u Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu, Hrvatska te na Sveučilištu u Zagrebu, Hrvatska.

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zagreb
Faculty of Science
Department of Geography

Doctoral Thesis

Hydrological and geomorphological characteristics of springs on the south side of the Medvednica Nature park

Ivan Martinić
Doctoral University Study of *Geography*

Abstract: Exactly 900 springs have been mapped on the southern slopes of the Medvednica mountain, and it was found that their number is much higher than previously assumed. The discharge of the springs is generally less than 1 l/s, with most springs discharging between 0,01 and 0,1 l/s. The number of springs decreases with distance from known faults and contact zones. Differences in the number and density of springs were determined with respect to the lithostratigraphic units of the study area, with the largest number of springs occurring in the area of parametamorphic rocks of Devonian and Carboniferous age. The highest density was found in the area of Paleogene conglomerates and sandstones. In terms of morphometric characteristics, the springs occur most frequently on concave and convergent slopes and on slopes with an inclination from 12° to 32°. The type was determined for most of the springs, with helocrene springs being the most common. By monitoring several springs, their hydrological and physico-chemical characteristics were determined. The effects of the treatment of roads with de-icing agents on water quality were also recorded.

223 pages; 121 figures; 32 tables; 237 references; original in Croatian

Keywords: spatial distribution, discharge, mapping, morphometry, physico-chemical characteristics of water

Supervisor: dr. sc. Ivan Čanjevac, assoc. prof.

Reviewers: Danijel Orešić, prof. dr. sc.
Nenad Buzjak, prof. dr. sc.
Josip Terzić, dr. sc.

Thesis submitted: 19.10.2021.

Thesis accepted: 5.9.2024.

Thesis defense: 15.10.2024., 12:00h

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

Sadržaj

1.	UVOD.....	1
1.1.	O izvorima.....	1
1.2.	Ciljevi istraživanja i hipoteze.....	4
1.3.	Opis područja istraživanja.....	5
2.	METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA.....	12
2.1.	Prikupljanje podataka.....	12
2.2.	Obrada podataka.....	13
2.3.	Praćenje izvora.....	14
3.	PRETHODNA ISTRAŽIVANJA.....	16
4.	REZULTATI.....	31
4.1.	Rezultati kartiranja – broj, gustoća i prostorni raspored izvora.....	31
4.2.	Hidrološka obilježja izvora.....	36
4.2.1.	Kategorije izdašnosti.....	36
4.2.2.	Ostala hidrološka obilježja izvora.....	41
4.3.	Izvori i geološka obilježja prostora.....	42
4.3.1.	Broj i gustoća izvora prema litostratigrafskim jedinicama.....	42
4.3.2.	Udaljenost izvora od rasjeda.....	51
4.3.3.	Raspodjela kategorija izdašnosti u odnosu na geološka obilježja prostora.....	60
4.4.	Izvori i morfometrijska obilježja prostora.....	64
4.4.1.	Nadmorska visina.....	64
4.4.2.	Nagib padina.....	68
4.4.3.	Vertikalna raščlanjenost reljefa.....	72
4.4.4.	Ekspozicija (orijentacija) padina.....	78
4.4.5.	Zakrivljenost padina.....	82
4.4.6.	Indeks topografske vlažnosti (TWI).....	84
4.4.7.	Kategorije izdašnosti izvora prema morfometrijskim obilježjima prostora.....	88
4.5.	Fizikalno-kemijska obilježja izvorske vode.....	93
4.5.1.	Temperatura.....	93
4.5.2.	Vrijednosti pH.....	96
4.5.3.	Električna provodnost (EC).....	99
4.5.4.	Fizikalno-kemijska obilježja vode prema litostratigrafskim jedinicama.....	101
4.6.	Klasifikacija izvora.....	105
4.7.	Praćenje izvora.....	116
4.7.1.	Opća obilježja praćenih izvora.....	117
4.7.2.	Hidrološka obilježja praćenih izvora.....	127
4.7.3.	Fizikalno-kemijska obilježja praćenih izvora.....	136

5.	RASPRAVA.....	156
5.1.	Broj i gustoća izvora.....	156
5.2.	Utjecaj geoloških obilježja na pojavnost izvora.....	157
5.3.	Povezanost morfometrijskih obilježja i pojavnosti izvora.....	164
5.4.	Odnos kategorija izdašnosti izvora s geološkim i morfometrijskim obilježjima prostora...	173
5.5.	Čimbenici fizikalno-kemijskih obilježja izvorske vode.....	179
5.6.	Tipovi izvora Medvednice.....	188
5.7.	Posebnosti praćenih izvora.....	189
6.	ZAKLJUČCI.....	195
7.	POPIS LITERATURE I IZVORA.....	199

1. UVOD

1.1. O izvorima

Temeljni objekt istraživanja ovog rada su izvori vode. Izvor je široko rabljen hidrološki pojam koji se koristi u raznim strukama, ali i u svakodnevnom govoru. Iako je poimanje izvora relativno univerzalno, postoje brojne definicije tog pojma koje se djelomično razlikuju:

- *Izvor je mjesto gdje voda izvire iz zemlje i nastavlja teći ili gdje miruje u stajaćicama koje se kontinuirano dopunjavaju odozdo. Potpuno umjetni otvori, kao što su arteški bunari, ne smatraju se izvorima (Bryan, 1919);*
- *Izvor je mjesto gdje, bez pomoći čovjeka, voda teče iz stijene ili tla na kopno ili u tijelo površinske vode (Meinzer, 1923);*
- *Izvor je koncentrirani tok podzemne vode koji izbija na površinu kao tekuća voda (Tollman, 1937);*
- *Izvori su mjesta na površini zemlje gdje voda iz podzemlja izbija i otječe u karakterističnom toku (Schoewe, 1953);*
- *Izvor se definira kao pojava u kojoj zamjetan tok vode izlazi kroz prirodni otvor u stijeni ili tlu (Toth, 1971);*
- *Izvor je pojava prirodnog izlaska izvorske vode na površinu litosfere (Dukić, 1984);*
- *Izvori ili točke prirodnog, koncentriranog ispuštanja podzemne vode, ... (Van Everdingen, 1991);*
- *Izvori su mjesto prirodnog izbijanja podzemne vode na površinu u dovoljnoj količini da formira korito na zemljinoj površini (Webb i dr., 1998);*
- *Izvor je točka gdje voda iz podzemlja izbija na površinu Zemlje (uključujući dno oceana) (Florida Geological Survey, 2003);*
- *Izvori su prisutni tamo gdje površina kopna presijeca razinu vodnog lica (Alley i dr., 2007);*
- *Izvori su mjesta gdje voda iz podzemlja izlazi na površinu Zemlje, često tvoreći potok, jezerce ili močvaru (Glazier, 2014);*
- *Izvor je mjesto prirodnog istjecanja podzemne vode na površini tla ili izravno u korito potoka, jezera ili mora (Encyclopedia Britannica, 2020);*

Neki autori izdvajaju posebnu pojavu koju nazivamo pištaline (engl. *seepage*), odnosno mjesta ili površine na kojima voda iz nezasićene zone (npr. sloj tla ili regolita) izlazi na površinu zemlje. Dio autora smatra ih podvrstom izvora, dok ih neki izdvajaju kao posebne pojave:

- *Pištaline (engl. seepage) su vrsta izvora kod kojih voda ne izlazi na površinu iz nekog određenog otvora, već kroz pore tla na području značajne veličine. Količina vode koju daje većina curenja je mala. Mnoge močvare zapravo su pištaline velikih razmjera (Bryan, 1919);*
- *Izraz procjedni izvor (pištalina) često se ograničava na izvore s malim protokom. Svako značajno područje u kojem voda curi na površinu naziva se procjedno područje (Meinzer, 1923);*
- *Difuzno procjeđivanje može se odvijati bez stvaranja izvora, iako sporo curenje može biti popraćeno istjecanjem dovoljno koncentriranim i lokaliziranim da formira izvore. Voda skupljena u depresijama ili tokovima potoka putem procjeđivanja iz močvare vjerojatno se ne bi trebala klasificirati kao izvorska voda, budući da se opskrbljuje procjeđivanjem površinske vode, a ne u potpunosti podzemnom vodom (Tollman, 1937);*
- *Tamo gdje voda izlazi na površinu, ali ne otječe, to se naziva pištalina (Schoewe, 1953);*
- *Pištaline su oblici difuznog izlaženja podzemne vode u tekućem stanju na površinu kopna prosječnom brzinom jednakom ili većom od lokalne evapotranspiracije (Toth, 1971).*

Iz navedenih definicija vidljivo je kako se većina autora slaže da su izvori mjesto gdje podzemna voda izbija na površinu Zemlje (uključujući dno mora, jezera i drugih vodenih površina). Nadalje, problem nastaje prilikom definiranja pojma podzemna voda. Na taj problem upozorio je Meinzer još početkom 20. stoljeća (Meinzer, 1923). Ukratko, dio autora smatra kako je podzemna voda samo ona koja se nalazi u zasićenoj zoni, odnosno ispod razine vodnog lica (npr. Meinzer, 1923; Baldwin i McGuinness, 1963). Drugi dio autora podzemnom vodom smatra svu vodu koja se nalazi ispod razine Zemljine površine, bilo u zasićenoj ili nezasićenog zoni (npr. Ojo i dr. 2012; Brands i dr., 2017). Sukladno tome, tumačenje ranije navedenih definicija izvora može biti neujednačeno, budući da neki istraživači smatraju kako se izvori opskrbljuju samo vodom ispod razine vodnog lica, dok drugi smatraju da se opskrbljuju svom vodom ispod razine Zemlje.

Unutar ovog istraživanja pod pojmom **izvor** uzete su sve pojave kod kojih voda porijeklom ispod razine Zemljine površine izbija na Zemljinu površinu, bilo koncentrirano ili difuzno. Dakle u obzir su uzeti i *pravi* izvori (čija voda dolazi iz zasićene zone, odnosno vodonosnika) i pištaline. Prvi razlog za

to bio je taj što je terenski vrlo teško razlikovati dvije navedene pojave, bilo prema hidrološkim, bilo prema morfološkim obilježjima. Naime, većina istraživanih oblika izvora imali su više ili manje definiran morfološki oblik (izvorišni obluk), neovisno o količini ili obilježjima vode. Neki *pravi* medvednički izvori nemaju vrlo izraženu morfologiju te su često relativno male izdašnosti, ali pokazuju stalnost. S druge strane dio izvora koji se opskrbljuje većinom vodom iz nezasićene zone imali su vrlo velike i izražene izvorišne obluge i relativno velike protoke. Drugi razlog je taj što se i veliki dio izvora opskrbljuje i vodom iz vodonosnika i vodom iz nezasićene zone, te imaju difuzan način izlaska vode na površinu.

Raznolikost izvora te složenost procesa zaslužnih za njihov nastanak čine ih zanimljivim objektima proučavanja. Većina izvorske vode potječe od padalina koje prodiru u podzemlje, gdje se voda kraće ili dulje zadržava (od nekoliko sati do nekoliko desetaka tisuća godina). Pod utjecajem gravitacijske sile i/ili različitih tlakova podzemna voda izbija na površinu (Glazier, 2014). Voda može izvirati na površinu iz tla, regolita ili stijena, odnosno duž pora, pukotina i šupljina. Izvorska voda može izlaziti kapanjem, stvaranjem koncentriranoga toka (potoka ili rijeke), formiranjem jezera, močvare ili pak uzlaznim izbijanjem (Springer i Stevens, 2009; Glazier 2014). Pojavnost izvora, način istjecanja vode, ali i druga obilježja najviše su određeni obilježjima vodonosnika iz kojega voda izlazi na površinu (Glazier, 2014).

Izvori imaju vrlo važnu ekološku ulogu. Čine važnu sastavnicu u funkcioniranju ekosustava, a pojedini izvori važna su žarišta bioraznolikosti. Zbog svoje relativno male veličine i izoliranosti vrlo su osjetljiva i ugrožena mikrostaništa (Culver i dr., 2006; Springer i dr., 2015; Pozojević i dr., 2018; Cantonati i dr. 2020; 2021).

Osim ekološke važnosti izvori su kroz povijest imali veliku važnost za čovjeka u obliku izravnog korištenja. Prvenstveno su korišteni kao izvor pitke vode, a služili su (i još uvijek služe) i u zdravstvene svrhe (van Tubergen i van der Linden, 2002; Gianfaldoni i dr., 2017). Pojedini izvori imaju duhovnu i religijsku važnost (Risko, 2018; Bikse i Gavinolla, 2021), a u novije vrijeme izvori su dio turističke ponude, posebno termalni izvori (toplice) (Fifty i dr., 2020; Bikse i Gavinolla, 2021) te atraktivni krški izvori (npr. Antić i dr., 2019.; France Voyage; Una Spring of Life).

Zbog svoje važnosti, izvori su bili predmet znanstvenih proučavanja već od kraja 17. stoljeća (Perrault, 1674). Razvojem znanosti kroz 19., a posebno kroz 20. i 21. stoljeće, izvori su postali predmetom proučavanja različitih znanstvenih polja i grana, kao što su (hidro)geologija, hidrologija,

geomorfologija, (hidro)geografija, (hidro)biologija (ekologija), (hidro)kemija i dr. Razlog tomu je posebnost izvora kao pojave jer čine dodirnu točku i poveznicu hidrosfere, litosfere, biosfere i atmosfere. Rezultat raznolikih proučavanja izvora bogate su spoznaje o njihovim različitim obilježjima, kao i razvoj brojnih klasifikacija izvora.

1.2. Ciljevi istraživanja i hipoteze

Cilj ovog rada je prikazati i analizirati hidrološka i geomorfološka obilježja izvora na području prisojne padine Medvednice. Prema dosadašnjim saznanjima izvori Medvednice su mnogobrojni, ali relativno slabije izdašnosti (Plan upravljanja, 2009; Lovrić i dr., 2017; Brletić, 2017). Pojedini izdašniji izvori kaptirani su u svrhu lokalne vodoopskrbe (Brkić i Čakarun, 1998a; 1998b; Slišković i Šarin, 1999a; 1999b), međutim većina ih je danas u vrlo lošem stanju ili čak i izvan funkcije (Lovrić i dr., 2017).

Prostor istraživanja obuhvaća prisojne padine Parka prirode Medvednica, odnosno dio parka koji se nalazi na teritoriju Grada Zagreba. Rad prikazuje njihov broj, prostorni raspored i prostorna obilježja, zajedno s prikupljenim podacima o njihovim hidrološkim obilježjima (izdašnost) te određenim hidrokemijskim obilježjima. Na temelju prikupljenih podataka i njihove analize utemeljeni su međuodnosi između izvora i (hidro)geoloških te geomorfoloških obilježja prostora. Praćenjem odabranih izvora ustanovljena su njihova hidrološka i hidrokemijska obilježja te međusobne razlike. Osim navedenog, u radu je prikazan dio ljudskog utjecaja na izvore, odnosno promjenu njihove morfologije i utjecaja na hidrokemijska obilježja vode. Na temelju prikupljenih podataka provedena je klasifikacija izvora.

Konkretni ciljevi istraživanja su idući:

C1. Uspostaviti bazu podataka izvora koja će sadržavati podatke o smještaju i osnovnim hidrološkim i geomorfološkim obilježjima;

C2. Ustanoviti prostorne pravilnosti pojavljivanja izvora na istraživanom području;

C3. Provesti klasifikaciju izvora istraživanog područja na temelju hidroloških i geomorfoloških obilježja;

C4. Utvrditi antropogeni utjecaj na fizikalno-kemijska obilježja vode.

Hipoteze čijim se dokazivanjem pokušavaju utvrditi prostorna i hidrološka obilježja izvora te ostvariti ciljeve istraživanja su:

H1. Na prisojnoj strani Medvednice postoji više izvora nego što je zabilježeno u Prostornom planu Parka prirode Medvednica (2014) i dostupnim kartografskim izvorima;

H2. Izvori najveće izdašnosti na istraživanom području nalaze se iznad 600 metara nadmorske visine;

H3. Na istraživanom području više od 80 % izvora ima srednju godišnju izdašnost manju od 0,1 L/s;

H4. Na istraživanom području više od 80 % izvora pripada reokrenom ili helokrenom tipu;

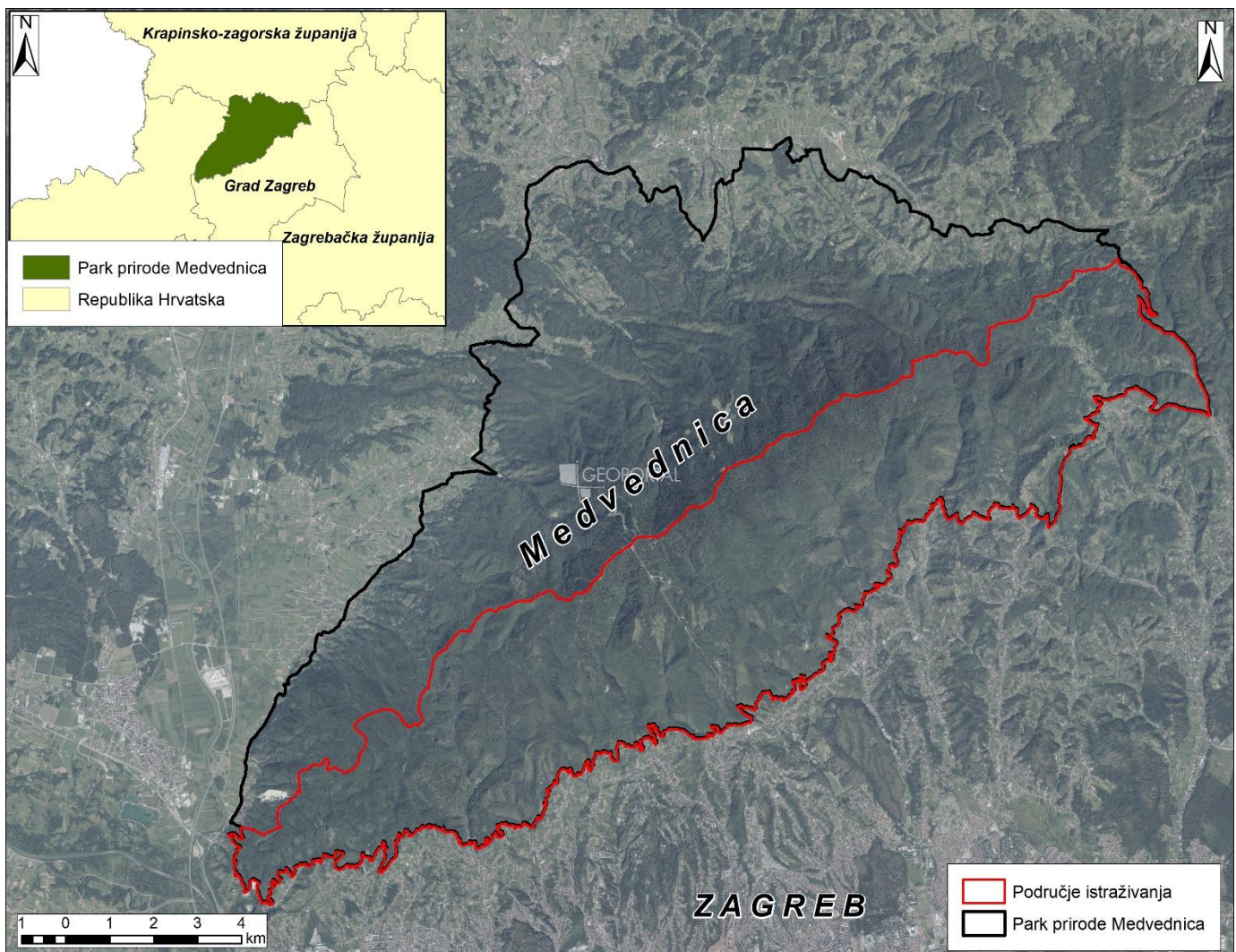
H5. Izvori izloženi antropogenom pritisku imaju veću varijabilnost fizikalno-kemijskih obilježja vode.

Prva hipoteza temelji se na preliminarnim istraživanjima prilikom kojih je uočen relativno veliki broj izvora na malom prostoru te nepostojanju istih na dostupnim kartografskim materijalima (Martinić i dr., 2019). Druga hipoteza temelji se na činjenici da većina potoka počinje svoj tok na višim nadmorskim visinama, te se u pojedinim dokumentima navodi kako se (izdašniji) izvori nalaze na višim nadmorskim visinama (Brkić i Čakarun, 1998a; 1998b; HAOP, 2015). Treća i četvrta hipoteza također se temelje na preliminarnim i prethodnim istraživanjima (Brletić, 2017; Martinić i dr., 2019), gdje su zabilježena navedena obilježja. Peta hipoteza pretpostavljena je na temelju prethodnih istraživanja (Jurišić i dr., 2015; Bulić, 2016), u kojima je utvrđen antropogeni utjecaj na okoliš Medvednice te pretpostavke da ljudski utjecaj za posljedicu ima promjene i u obilježjima izvorske vode (Siwek i Chelwicki, 2004; Khatri i Tyagi, 2014; Szczucińska, 2016).

1.3. Opis područja istraživanja

Medvednica je otočna gora koja se nalazi u Središnjoj Hrvatskoj. Na sjeveru nadvisuje grad Zagreb, kojemu djelomično pripada i administrativno. Smještena je između naplavnih ravnica rijeke Save na jugu, Krapine na sjeverozapadu te Lonje na sjeveroistoku. Pruža se u smjeru jugozapad-sjeveroistok, u duljini od 40-ak kilometara, dok joj je najširi dio u smjeru jugoistok-sjeverozapad oko 8,5 km (Roglić, 2005). Dio Medvednice proglašen je Parkom prirode 1981. godine. Granice Parka više puta su se mijenjale, a danas zauzima površinu od 179 km² (Plan upravljanja, 2009). Proteže se od Podsuseda i Ivaneca Bistranskog na jugozapadu do državne ceste D29, koja povezuje Kašinu s

Marijom Bisticom, na sjeveroistoku. Na južnom dijelu granice se protežu uz zagrebačka podsljemenska naselja, a na sjeveru je omeđen naseljima Hrvatskog zagorja smještenima podno Medvednice. Prostor istraživanja obuhvaća samo prisojnu stranu Parka prirode Medvednica. Površina istraživanog prostora je 85,45 km², što čini oko 47 % Parka prirode. Granice su određene granicom parka prirode i grebenom Medvednice unutar tih granica (Sl. 1.3.1). Unutar istraživanog područja nalazi se i nekoliko posebnih rezervata šumske vegetacije, te značajni krajobraz Lipa-Rog i geomorfološki spomenik prirode spilja Veternica. Treba napomenuti kako je cijeli Park prirode Medvednica dio ekološke mreže Natura 2000 HR2000583 (*Natura 2000*, n.d.).



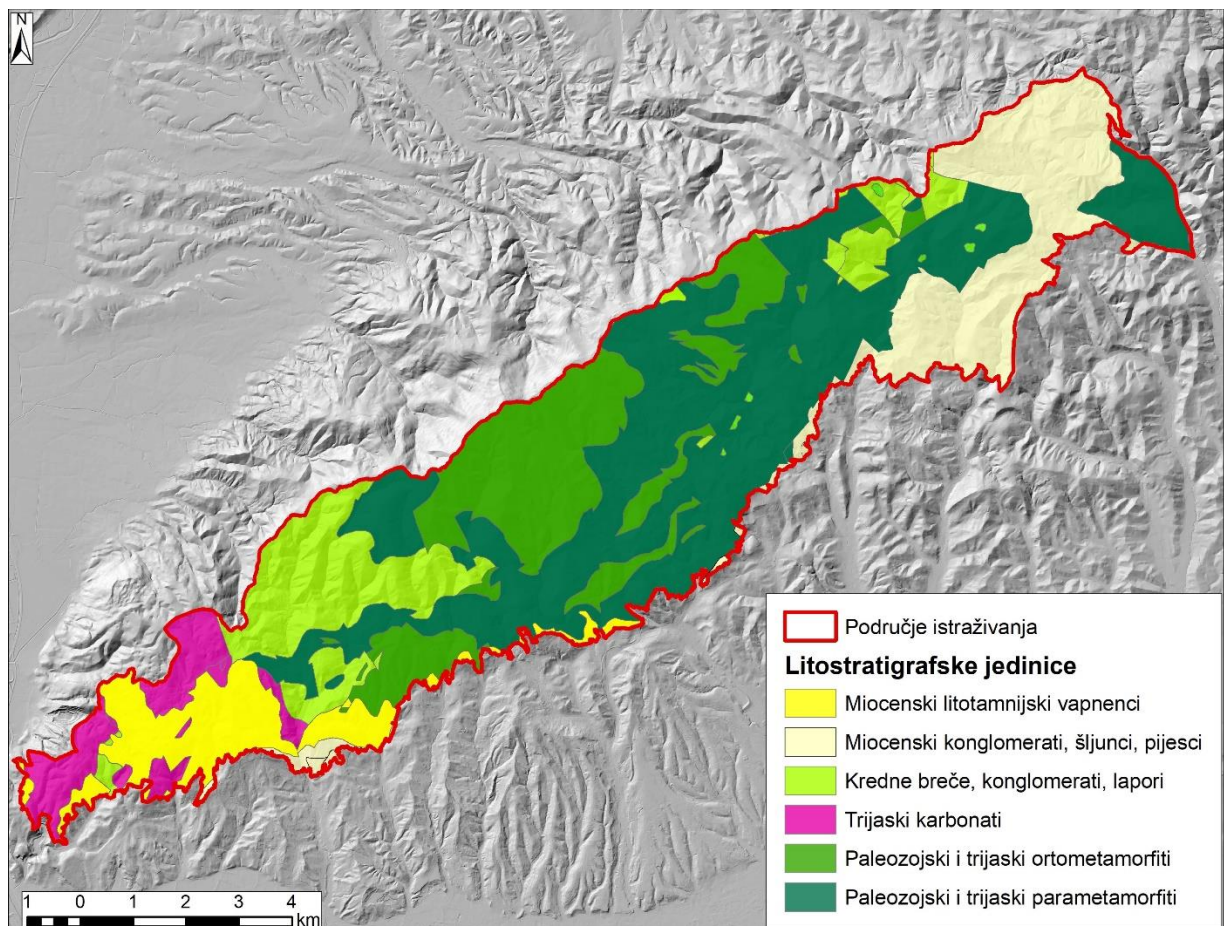
Sl. 1.3.1. Geografski položaj područja istraživanja

Izvor: Bioportal, n.d.; podloga - ortofoto snimka DGU (2024)

Geološka obilježja Medvednice ukazuju na njenu kompleksnu prošlost. Predtercijarna jezgra Medvednice okružena je mlađim neogenskim i kvartarnim sedimentima te je geološki izolirana u odnosu na južnoalpske i dinarske predjele (Šikić, 1995). Medvednica je geološki i litološki kompleksnog sastava. Njen glavni trup sastavljen je od paleozojskih, mezozojskih, paleogenih i neogenih stijena (Belak i dr., 2022). U širem geotektonskom sklopu u njoj se nalaze stiješnjeni elementi unutrašnjih Dinarida. U osnovnoj građi Medvednice najrasprostranjenije su paleozojske i trijasko metamorfne stijene, koje se prema porijeklu mogu svrstati u parametamorfite i ortometamorfite (Šikić, 1995; Belak i dr., 2022). Oni izgrađuju većinu istraživanog područja, primarno u središnjem dijelu (Sl. 1.3.2), u kojem je, prema novijim istraživanjima, većina stijena trijasko starosti (Belak i dr., 2022). U slučaju ortometamorfnih stijena riječ je pretežno o zelenim škriljancima, a podređeno amfibolitskim škriljancima, metagrabrima i metadijabazima. Parametamorfne stijene predstavljaju pretežno škriljavi kvarcni konglomerati i brečokonglomerati, škriljave grauvake i siliti te rekristalizirani vapnenci i dolomiti (Šikić i dr., 1977; 1979; Šikić, 1995). Trijasko karbonatne stijene dominantne se na jugozapadu istraživanog područja. Donjotrijaski sedimenti sastavljeni su većinom od pješčenjaka, silita, šejlova, vapnenačkih lapora te vapnenaca i dolomita. Srednjotrijasko naslage čine dolomiti i dolomitizirani vapnenci, dok naslage gornjeg trijasa čine pretežno dolomiti (Šikić i dr., 1977; 1979; Šikić, 1995). Gornjosenonske (gornjokredne) naslage nalaze se većinom između paleozojskih i trijaskih naslaga na jugozapadu istraživanog područja, iako su pojedinačno rasprostranjeni duž cijele Medvednice (Sl. 1.3.2). Radi se o različitim vrstama naslaga, pretežito flišolikih, ali su zastupljene i breče, konglomerati, vapnenci i lapori. Neogenske naslage većinom su miocenske starosti. Pretežito su raspoređene na jugozapadnom dijelu Medvednice, gdje je najznačajnija pojava litotamnijskih vapnenaca, te na sjeveroistočnom dijelu istraživanog područja gdje su zastupljeni bazalni konglomerati, šljunci, pijesci, pješčenjaci te pločasti vapnenci (Šikić i dr., 1977; 1979). Detaljniji opis litostratigrafskih jedinica istraživanog područja i njihovih hidrogeoloških obilježja u vezi s pojavljivanjem izvora opisan je u poglavlju s rezultatima zbog lakšeg praćenja.

Hidrogeološka obilježja prostora također su raznolika, ovisno o hidrogeološkim svojstvima stijena. Na većini područja dominiraju stijene slabe i vrlo slabe propusnosti. Postoje i područja osrednje i dobre propusnosti s kavernožno-pukotinskom poroznošću koje prvenstveno vežemo uz krška područja na jugozapadu istraživanog područja (Brkić i Čakarun, 1998a; 1998b; Slišković i Šarin, 1999a; 1999b). Na tom prostoru razvijeni su krški oblici kao što su ponikve, ponori i spilja Veternica koji svedoče propusnosti stijena. Prostorno ograničene pojave krša nalaze se i na južnim padinama središnjeg dijela

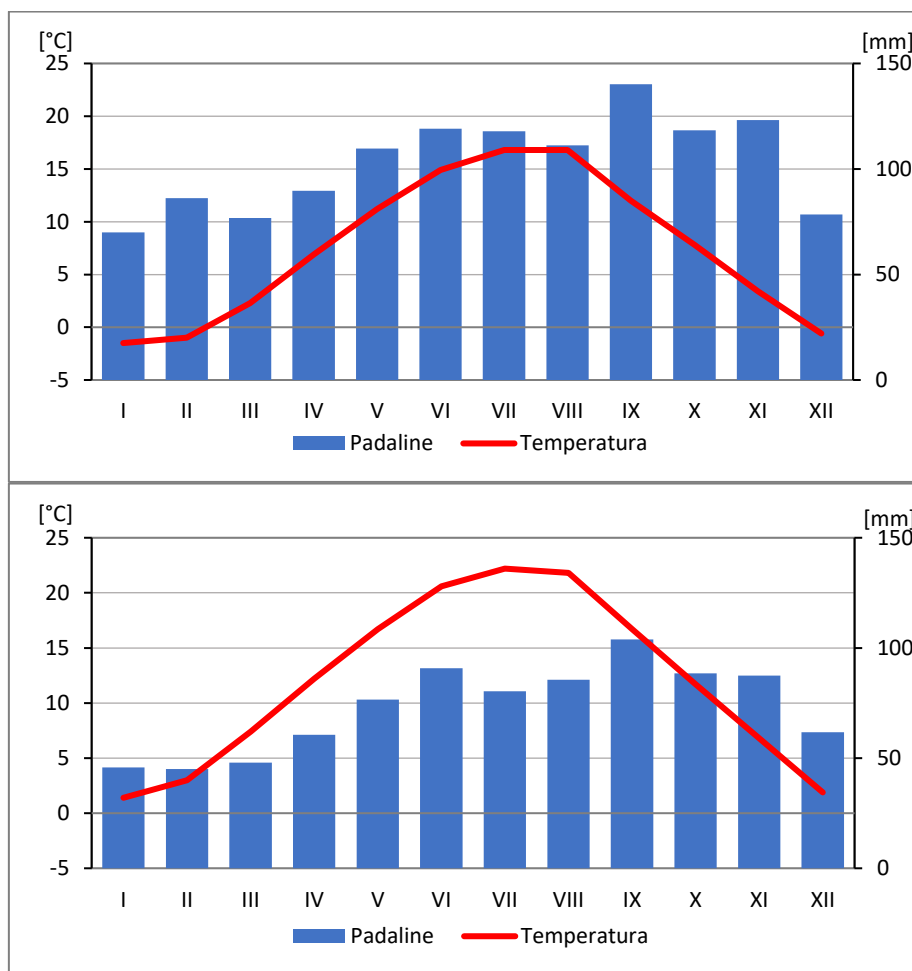
masiva Medvednice, u području Pustodola, izgrađenog od mramoriziranih vapnenaca paleozoika (Brkić i Čakarun, 1998b). Voda potoka Pustodol ponire u koritu, a trasiranjem je dokazano kako se na površinu ponovno vraća na izvorima Ribnjak u Gračanima, koji se nalaze izvan istraživanog područja (Šikić, 1995; Brkić i Čakarun, 1998b).



Sl. 1.3.2. Osnovna geološka karta istraživanog područja
 Izvor: geološki podaci prema Šikić i dr., 1971 i Basch, 1981

Osim (hidro)geoloških obilježja prostora, važan utjecaj na obilježja izvora i njihovu pojavnost općenito imaju klimatska obilježja prostora, posebno količina i vrsta padalina te evapotranspiracija. Klimatska obilježja istraživanog područja razlikuju se ovisno o nadmorskoj visini. Za potrebe određivanja klimatskih obilježja korišteni su podaci s dviju meteoroloških postaja. Meteorološka stanica Puntijarka jedina je unutar granica istraživanog područja i Parka prirode Medvednica, a nalazi se u središnjem dijelu na nadmorskoj visini od 991 metar. Druga korištena stanica je Zagreb Maksimir, koja se nalazi u istoimenom dijelu grada na nadmorskoj visini od 123 metra. Izrađeni su klimadijagrami za dvije navedene stanice korištenjem podataka o srednjim mjesečnim količinama

padalina i srednjim mjesečnim temperaturama u klimatološkom razdoblju od 1991. do 2020. Najvlažniji mjesec u slučaju obje postaje je rujan, s prosječno 140 mm na postaji Puntijarka, odnosno 104 mm na postaji Maksimir (Sl. 1.3.3). Najmanje padalina na postaji Puntijarka je u siječnju, prosječno 70 mm, odnosno u veljači na postaji Maksimir, u prosjeku 45 mm. Godišnji hod temperature na dvije promatrane postaje je isti, naravno uz niže temperature na postaji Puntijarka. Najniže prosječne temperature zabilježene su u siječnju, - 1,5 °C na Puntijarki, odnosno 1,4 °C u Maksimiru (Sl. 1.3.3). Temperature postupno rastu tijekom godine, do maksimalnih prosječnih temperatura zabilježenih u srpnju, 16,8 °C na postaji Puntijarka, odnosno 22,2 °C na postaji Zagreb Maksimir. Prosječna godišnja količina padalina u promatranom razdoblju na stanici Puntijarka je 1240 mm, a na stanici Zagreb Maksimir 874 mm. Srednje godišnje temperature za isto razdoblje iznose 7,4 °C na Puntijarki te 11,9 °C u Maksimiru (DHMZ, 2024).



Sl. 1.3.3. Srednje mjesečne temperature i srednje mjesečne količine padalina na postaji Puntijarka (gore) i Zagreb Maksimir (dolje) u razdoblju od 1991. do 2020. izvor: izrađeno prema podacima DHMZ (2024)

Prema navedenom, klima na obje analizirane postaje odgovara tipu umjereno tople vlažne klime, odnosno tipu Cf prema Köppen-Geigerovoj klasifikaciji. Postaja Puntijarka pripada podtipu Cfb, odnosno umjereno toploj vlažnoj klimi s toplim ljetima, dok postaja Zagreb Maksimir pripada podtipu Cfa, umjereno toploj vlažnoj klimi s vrućim ljetima (Kottek i dr., 2006). Njihov pluviometrijski režim, odnosno godišnji raspored padalina, odgovara kontinentskom tipu, što znači da većina padalina pada u toplijem dijelu godine. Za razdoblje od 1991. do 2020. izračunato je kako na postaji Puntijarka u toplijem dijelu godine, odnosno u razdoblju od travnja do rujna, padne 55,5 % padalina. Na postaji Zagreb Maksimir za isto razdoblje izračunato je kako u toplijem dijelu godine padne 56,9 % padalina.

Medvednica, a time i područje istraživanja, prema geomorfološkoj regionalizaciji smještena je u megamakrogeomorfološku regiju Panonski bazen, odnosno u makrogeomorfološku regiju *Gorsko-zavalsko područje SZ Hrvatske*. Još detaljnije, prostor istraživanja pripada mezogeomorfološkoj regiji *Gorski hrbat Medvednice s predgorskim stepenicama* i subgeomorfološku regiju *Gorski hrbat Medvednice* (Bognar, 2001). U poprečnom profilu Medvednica je jedinstvena gora, s izraženim hrptom koji ujedno predstavlja i jedinsvenu razvodnicu (Roglić, 2005). Najviša točka istraživanog područja je i najviši vrh Medvednice, visine 1033 metra nad morem. Najniže nadmorske visine su u rubnim dijelovima uz naselje Podsused, na visini od oko 170 metara. Cijeli prostor istraživanja ima obilježja gorskog reljefa, s prosječnim nagibom padina od 21,38° i prosječnom vertikalnom raščlanjenosti 255 m/km². Većina istraživanog područja ima obilježja fluviudenudacijskog morfofenetskog tipa reljefa, čemu svjedoče brojne usječene vododerine, jaruge i potočne doline, kao i padine na kojima su aktivni procesi kliženja, puzanja i odronjavanja. Osim fluviudenudacijskog reljefa, prisutni su i krški reljefni oblici pa tako postoje i područja krškog i fluviokrškog morfofenetskog tipa reljefa. Posebno su izražena na jugozapadu istraživanog područja na područjima trijaskih karbonata i miocenskih litotamnijskih vapnenaca, gdje je izraženije podzemno otjecanje. Tome svjedoči i prisutnost brojnih ponikava, zatim ponora, krških izvora te spilje Veternice. Roglić (2005) je Medvednicu podijelio na 3 dijela s obzirom na njen uzdužni profil, izdvajajući upravo jugozapadni (fluvio)krški dio kao posebnu cjelinu. Druga cjelina odnosi se na središnji dio Medvednice, u kojem su izražene dubokousječene jaruge i potočne doline, odnosno fluviudenudacijski reljef. Treća cjelina nalazi se izvan istraživanog područja, na sjeveroistoku. Detaljna morfometrijska analiza prostora provedena je zajedno s analizom prostorne raspodjele izvora u poglavlju Rezultati.

Od hidroloških elemenata istraživnog prostora ističe se dvadesetak potoka i njihovih pritoka, koji teku usijećenim potočnim dolinama prema rijeci Savi na jugu. Potoci su uglavnom bujičnih obilježja, s relativno brzom promjenom hidroloških i hidrauličkih obilježja kao reakcijom na padaline (Žugaj, 2010). Na terenu je zabilježeno kako u vrlo sušnim uvjetima neki dijelovi tokova znaju presušiti, iako je većina potoka zapravo stalna na izlazu iz parka prirode. Procijenjeno je da najmanji potoci (npr. Jezeranec, Javorščak, Mačkovec) imaju srednje godišnje protoke od oko 10 L/s. Na nekim vodom bogatijim potocima kao što su Vrapčak, Črnomerec, Kraljevec, Bliznec, Štefanovec, Vidovec, Trnava i Kašina postoje i hidrološke postaje Državnog hidrometeorološkog zavoda. Srednje vrijednosti protoka u posljednjih tridesetak godina na tim potocima kreću se od najmanjih 46 L/s na potoku Črnomercu, do najvećih 129 L/s na potoku Kašina (DHMZ, 2024).

2. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

2.1. Prikupljanje podataka

Podaci o izvorima na području Medvednice prikupljeni su iz različitih dostupnih pisanih, no ponajprije kartografskih izvora. Korištene su sve javno dostupne kartografske podloge kako bi se preuzele i ucertale lokacije dosad kartiranih izvora. Upotrebljavane su: Topografska karta 1:25 000, Hrvatska osnovna karta 1:5000 (DGU, 2024), Osnovna geološka karta 1:100 000 (Šikić i dr., 1977; Basch 1981), Osnovna hidrogeološka karta 1:100 000 (Brkić i Čakarun, 1998a; Slišković i Šarin, 1999a) te karta iz Geološkog vodiča Medvednice 1:50 000 (Šikić, 1995). Od ostalih dokumenata korišten je Plan upravljanja Parka prirode Medvednica (Plan upravljanja, 2009). Korišteni su i podaci Brletić (2017) u kojem su kartirani izvori na manjem dijelu istraživanog područja. Većina kartografskih podataka se podudarala te su Topografska karta i Hrvatska osnovna karta imale najveći broj ucertanih izvora. Najdetaljniji podaci bili su iz spomenutog istraživanja Brletića (2017). Na temelju analiziranih karata i dostupnih podataka, u GIS okruženju ArcMap 10.7 formiran je točkasti sloj lokacija izvora.

Korištenjem digitalnog modela reljefa rezolucije ćelija 5x5 m izrađenog od strane Geografskog odsjeka na temelju oblaka točaka Državne geodetske uprave te digitalnog modela reljefa Grada Zagreba rezolucije 2x2 m (Zg geoportal, 2012), u GIS okruženju su označeni počeci korita (*channel heads*), odnosno vidljiva udubljenja u reljefu nakon kojih su formirane jaruge i potočne doline. Njihove lokacije često se vežu uz izvore, odnosno neke od njih predstavljaju izvorišne obluka. Tako je stvoren sloj točaka s potencijalnim lokacijama izvora. Isti sloj prebačen je u oblik datoteke kml kako bi se mogao koristiti na terenu unutar mobilnih aplikacija MapsMe i Google Maps.

Terenski izlasci obavljani su kontinuirano u razdoblju od srpnja 2020. do veljače 2024. godine, uz naznaku da je nekoliko izvora kartirano u ožujku 2019. godine. Ukupno je odrađeno 66 terenskih izlazaka u svrhu kartiranja. Tereni su planirani na temelju navedenog točkastog sloja te su odrađivani lokalno, vezani uz manje područje povezano planinarskim stazama, putevima i cestama.

Na terenu su obilježene potencijalne lokacije izvora te je u slučaju pronalaska izvora on fotografiran nekoliko puta kamerom s ugrađenim preciznim GPS-om rezultat čega su georeferencirane fotografije istraženih izvora. Izvoru su potom izmjerena fizikalno-kemijska obilježja korištenjem prijenosnog multimetra HI991300 tvrtke Hanna Instruments, koji mjeri temperaturu, pH i električnu provodnost (EC) vode (Sl. 2.1.1). Volumetrijskom metodom izmjerena je izdašnost (protok) izvora korištenjem posude s označenim volumenom i štopericom te pomoćnim alatima za usmjeravanje vode (lopatica,

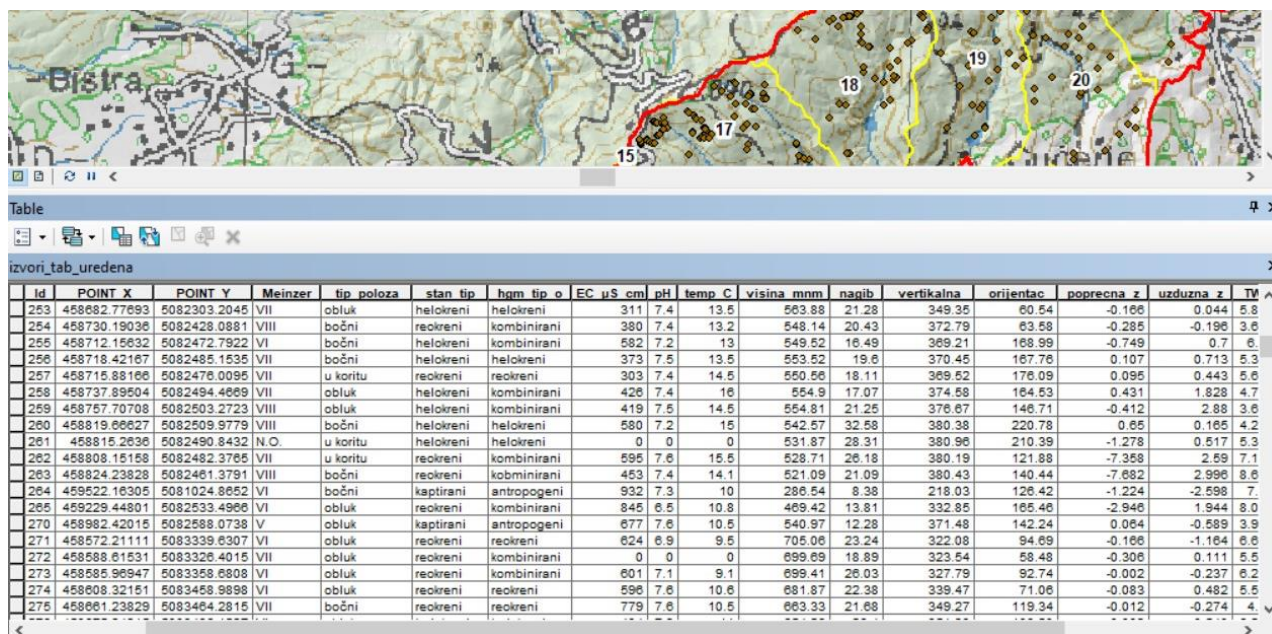
cijev). Izvorska voda je preusmjerena kroz cijev kako bi se napunila posuda s označenim volumenom. Vrijeme potrebno za punjenje mjerilo se štopericom. Protok je izračunat dijeljenjem izmjenog volumena s izmjerenim vremenom. Proces je ponovljen tri puta i iz tih mjerenja izračunata je prosječna vrijednost izdašnosti. Svi mjereni podaci zabilježeni su u terenski dnevnik.



Sl. 2.1.1. Mjerenje fizikalno-kemijskih obilježja izvorske vode na terenu

2.2. Obrada podataka

Po dolasku s terena obavljena je obrada prikupljenih podataka. U obliku tablice u programu MS Excel napravljena je baza podataka izvora sa sljedećim atributima: šifra izvora, koordinate X i Y prema koordinatnom sustavu HTRS 96 TM, kategorija izdašnosti, položajni tip izvora, stanišni (hidrološki) tip izvora, hidrogeomorfološki tip izvora, temperatura, EC, pH, nadmorska visina, nagib, vertikalna račlanjenost, ekspozicija, poprečna zakrivljenost, uzdužna zakrivljenost, indeks topografske vlažnosti, udaljenost od rasjeda te udaljenost od lineamenta (Sl. 2.2.1). Sve prikupljene fotografije uvezene su u GIS okruženje korištenjem alata *GeoTaged Photos to Points*, čime je svaka lokacija georeferenciranih fotografija bila smještena u prostor. Na temelju tih podataka stvoren je točkasti sloj kartiranih izvora. Svakom izvoru pridodana je pripadajuća šifra koja je odgovarala onoj u MS Excel tablici. Podaci su iz MS Excel tablice preko iste šifre povezani i uvezeni u GIS okruženje u svrhu prostornih analiza i vizualizacije.



Sl. 2.2.1: Prikaz tablice točkastog sloja izvora i pripadajućih atributa

Na temelju volumetrijskih mjerenja i procjene hidroloških prilika, izvori su klasificirani u razrede izdašnosti prema Meinzeru (1923). Hidrološki uvjeti tijekom dana terenskog rada ocijenjeni su na temelju terenskih motrenja vodostaja vodotoka i dostupnih hidroloških i meteoroloških podataka s najbližih postaja.

U GIS okruženju provedena je analiza prostornog rasporeda izvora i vizualizacija svih podataka. Svrha prostornih analiza bila je ustanoviti postoje li povezanosti između pojedinih obilježja prostora s pojavnošću i obilježjima izvora. Korištenjem digitalnog modela reljefa rezolucije 5x5 m provedene su morfometrijske analize istraživanog područja i njihovog odnosa s položajem izvora. Analizirana je nadmorska visina, nagib padina, vertikalna raščlanjenost, orijentacija padina, zakrivljenost padina te indeks topografske vlažnosti. Zasebne morfometrijske metode detaljno su opisane prije pripadajućih rezultata zbog lakšeg praćenja i tumačenja. Geološke karte također su digitalizirane u programu ArcMap 10.7 u svrhu analize rasporeda izvora prema geološkim obilježjima prostora, odnosno rasporeda prema litostratigrafskim jedinicama te udaljenosti od rasjeda i geoloških lineamenta (rasjedi i kontakti). Statističke analize i vizualizacije statističkih podataka provedene su u programu MS Excel te korištenjem programskog dodatka XLSTAT za analizu varijance (ANOVA). Korištene statističke analize i pripadajuće metode detaljnije su opisane prije pripadajućih rezultata radi lakšeg tumačenja i interpretacije. Prilikom analiza korelacije korišten je Pearsonov koeficijent korelacije, a rezultati su interpretirani prema Evansu (1996; Tab. 2.2.1).

Tab. 2.2.1. Raspon vrijednosti Pearsonovog koeficijenta korelacije i odgovarajući opis stupnja povezanosti

Vrijednost koeficijenta	Stupanj povezanosti	Vrijednost koeficijenta	Stupanj povezanosti
0	Nema povezanosti	0	Nema povezanosti
od 0,01 do 0,19	Vrlo slaba pozitivna	od – 0,01 do – 0,19	Vrlo slaba negativna
od 0,20 do 0,39	Slaba pozitivna	od – 0,20 do – 0,39	Slaba negativna
od 0,40 do 0,59	Umjerena pozitivna	od – 0,40 do – 0,59	Umjerena negativna
od 0,60 do 0,79	Snažna pozitivna	od – 0,60 do – 0,79	Snažna negativna
od 0,80 do 0,99	Vrlo snažna pozitivna	od – 0,80 do – 0,99	Vrlo snažna negativna
1	Potpuna pozitivna veza	– 1	Potpuna negativna veza

Izvor: Evans (1996)

2.3. Praćenje izvora

Ukupno 6 izvora odabrano je za kontinuirano praćenje njihovih obilježja. To su: izvor Jambrišakovo vrelo, njemu susjedni izvor nazvan Mali Jambrišak, izvori Malog potoka nazvani Mali i Mini, Kraljičin zdenac te Karlovo izvor (izvor potoka Gračec). Njihove detaljne lokacije i obilježja opisani su u poglavlju Rezultati, u potpoglavlju Praćenje izvora. Na svim navedenim izvorima periodično su obavljena volumetrijska mjerenja protoka te su mjerena fizikalno kemijska obilježja (temperatura, pH i EC). U svrhu kontinuiranog praćenja na izvoru Jambrišakovo vrelo i izvoru Gračec postavljeni su automatski mjerni uređaji (*data loggeri*) HOBO U20L-04, tvrtke Onset, za mjerenje tlaka vodenog stupca, međutim samo oni u Jambrišakovom vrelu dali su upotrebljive rezultate. Razlozi za neuspjela mjerenja na Karlovom izvoru su djelom prirodni, a dijelom rezultat negativnog ljudskog utjecaja. Isti uređaji su korišteni i za mjerenje tlaka zraka kako bi se oduzeo atmosferski tlak od onog mjenenog u vodi, što omogućuje izračun vodostaja u izvoru. Drugi mjerni uređaj, HOBO U24-001, pratio je vrijednosti električne provodnosti (EC).

Na navedenim izvorima u tri navrata laboratorijski je određen ionski sastav vode, kako bi se utvrdio njihov hidrogeokemijski facijes, ali i kako bi se utvrdio potencijalni antropogeni utjecaj na kvalitetu izvorske vode. Laboratorijska analiza odrađena je u Laboratoriju za analizu geoloških materijala Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Korištena je metoda ionske kromatografije i titracije klorovodičnom kiselinom u IC sustavu Dionex ICS-9.

3. PRETHODNA ISTRAŽIVANJA

Istraživanja izvora su mnogobrojna i bave se različitim aspektima izvora. Ovdje je iznesen pregled onih istraživanja čiji su doprinosi utjecali na oblikovanje ovog istraživanja utemeljivanjem podijele izvora, metodološkim pristupom, rezultatima i zaključcima. Također, posebna pozornost posvećena je istraživanju izvora u Hrvatskoj, uključujući i Medvednicu.

Suvremena istraživanja izvora u svijetu

Unatoč korištenju modernih tehnologija u znanstvenim istraživanjima, pa tako i u istraživanju izvora, potreba za fundamentalnim (temeljnim) istraživanjima i dalje je velika zbog nedostatka osnovnih podataka o izvorima (Stevens i dr., 2021). Primjeri takvih istraživanja jesu kartiranja izvora i analiziranje njihova prostornoga rasporeda, istraživanja hidroloških obilježja izvora, geomorfoloških obilježja izvorišnih obluka i prostora u kojima se izvori pojavljuju, hidrogeoloških obilježja vodonosnika, fizikalno-kemijskih obilježja vode, određivanje biljnih i životinjskih vrsta u izvorima i sl.

Istraživanja hidroloških obilježja međusobno se razlikuju ovisno o broju, vrsti i veličini istraživanih izvora te namjeni istraživanja. Najčešća hidrološka istraživanja obuhvaćaju određivanje režima izvora, izdašnosti izvora i brzine njihove reakcije na padaline (Negi i Joshi, 2004; Vashisht i Sharma, 2007). Često se analiziraju hidrogrami izvora, odnosno recesijske krivulje (Kovács i Perrochet, 2008; Vashisht i Bam, 2013; Giacometti i dr., 2017). Upravo se analizama hidroloških obilježja izvora mogu odrediti određena svojstva vodonosnika (Birk i Hergarten, 2012; Fiorillo, 2014; Mostowik i dr., 2016). Danas u vrijeme klimatskih promjena vrlo su važna istraživanja koja prate promjene izdašnosti izvora, pogotovo u prostorima s naglim promjenama hidroloških prilika posljednjih dvaju desetljeća, kao što su primjerice prostori Himalaje (Tambe i dr., 2012; Agarwal i dr., 2012).

Geološka i hidrogeološka obilježja prostora, odnosno vodonosnika, drugi su ključan segment prilikom istraživanja izvora. Najčešće su hidrološka i hidrogeološka istraživanja vrlo usko povezana, a izvori se proučavaju kao indikator hidrogeoloških obilježja vodonosnika. Manga (2001) u svojem radu donosi pregled tehnika i pristupa u kojima se izvori koriste za proučavanje podzemnih tokova i aktivnih geoloških procesa. U radu je predstavljeno na koji način se koristeći trasiranje, podatke o temperaturi vode izvora te mjerenje izdašnosti može odrediti prosječno vrijeme zadržavanja vode u

podzemlju, donijeti zaključci vezano za kretanje podzemnih voda, procijeniti zalihe vodonosnika te odrediti hidraulička svojstva i druga hidrogeološka obilježja prostora. Nekim od navedenih metoda koriste se Cervi i dr. (2014) na području Apenina. Praćenjem protoka u rijekama i izvorima zajedno s procjenom bilance podzemnih voda odredili su prirodu punjenja istraživanoga vodonosnika te definirali njegove hidrogeološke granice. Na sličan način Mostowik i dr. (2021) definiraju obrasce punjenja vodonosnika i obilježja podzemnih tokova te brzinu reakcije izvora na padaline. Kontinuirano su pratili izdašnost, temperaturu i EC vode triju odabranih izvora te su analizirali povezanost mjerenih parametara s količinom padalina. Spomenutim istraživanjima važno je nadodati ona koja se bave izotopnim sastavima izvorske vode. Rezultati tih istraživanja koriste se prilikom određivanja mehanizama i područja opskrbe vodonosnika vodom (Ozyurt i dr., 2014; Feher i dr., 2024). Također pružaju podatke o vremenu zadržavanja vode u podzemlju (Boljat i dr., 2024) te pružaju uvid u lokalno značajna obilježja koja utječu na izotopni sastav vode (Dotsika i dr., 2018).

Kartiranje, odnosno određivanje lokacija izvora treća je bitna stavka za analiziranje obilježja izvora. Pojedini izvori, posebno oni veći i izraženi u prostoru (npr. veliki krški izvori) relativno su lako fizički dostupni te njihovo kartiranje i određivanje lokacije nije problematično. Međutim, brojni izvori male izdašnosti (ali ne i manje važnosti) vrlo su teško dostupni, bilo zbog vegetacije bilo zbog konfiguracije terena na kojem se nalaze. Također, njihov je broj često vrlo velik na malom prostoru, stoga ih je teško fizički obići i odrediti njihov položaj. Unatoč navedenim iskoracima razvoj tehnologije u posljednjih dvadesetak godina nije smanjio važnost terenskoga istraživanja, čak i za potrebe kartiranja izvora. U istraživanjima Płaczkowske i dr. (2015) te Mocior i dr. (2015) terenski je kartirano oko 400 izvora. Płaczkowska i dr. (2015) u svojem istraživanju analiziraju prostorni raspored početaka korita (eng. *channel heads*) na području gorja Bieszczady, dok Mocior i dr. (2015) analiziraju utjecaj prostornih obilježja na raspored izvora na istom području. Zaključak je obaju radova da se prostorni raspored i gustoća izvora ne mogu jednostavno povezati s određenim geomorfološkim obilježjem pojedinačno. Njihov je nastanak uvjetovan brojnim čimbenicima, odnosno njihovom kombinacijom, a glavni utjecaj imaju geološka obilježja prostora. Istraživanje Buczyńskoga i Rzone (2018) primjer je objedinjavanja geološkoga i hidrološkog tipa istraživanja zajedno s analiziranjem prostornoga rasporeda. Autori utvrđuju pravilnosti u prostornom rasporedu izvora u odnosu na litologiju, rasjede i tektonske diskontinuitete. Pokušavaju k tomu utvrditi kako su izdašnosti izvora, temperatura i specifična vodljivost vode povezane s istraživanim geološkim obilježjima prostora. Povezivanje erozijskih procesa na padinama s nastankom izvora istražuje Mazurek (2011) čije je istraživanje pokazalo da

veličina i oblik izvorišnih obluka ovise o aktivnim fluviudenudacijskim procesima. Corsini i dr. (2009) kartirali su oko 200 izvora na području sjevernih Apenina u Italiji. Na temelju prikupljenih podataka testirali su dva alata za predviđanje lokacije nekartiranih izvora preko računalnih GIS programa. Rezultati su pokazali da korišteni alati, odnosno modeli dobro predviđaju lokacije izvora, posebno kad se preklapaju dobiveni rezultati obaju alata. Niraula i dr. (2021) služe se računalnom kombinacijom GIS-a i strojnoga učenja korištenjem nekoliko metoda s ciljem razvoja modela za predviđanje lokacija izvora na područjima za koja nedostaju podaci. Prilikom istraživanja korišteno je 20 varijabli, uključujući geološka, topografska i hidrološka obilježja testiranoga prostora. Metodama treninga i validacije rezultata pokazalo se kako rezultati variraju ovisno o metodama. Najuspješnija metoda pružila je točnost od 94 %. Slična istraživanja provedena su i na prostoru Turske (Ozdemir, 2011), Irana (Pourtaghi i Pourghasemi, 2014; Moghaddam i dr., 2015; Tien Bui i dr., 2019), Tunisa (Msaddek i dr., 2021), Slovačke i Mađarske (Iván i dr., 2020) i Kine (Chen i dr., 2020). Navedena istraživanja pokazuju da razvoj tehnologije može imati važnu ulogu u kartiranju izvora te predviđanju njihovih lokacija te da će se razvojem novih metoda i preciznijih modela reljefa takvi pristupi sve više upotrebljavati.

Vrlo dobar primjer interdisciplinarnoga rada, ali i rada koji također ističe ekološku važnost izvora, jest onaj Freeda i dr. (2019). Autori ističu ulogu izvora kako u održavanju bioraznolikosti tako i u podupiranju stočarstva u semiaridnim krajevima američke savezne države Oregon. Unatoč svojoj važnosti izvori su na istraživanom području slabo istraženi. Provedena je prostorna analiza na 2519 kartiranih izvora s ciljem utvrđivanja povezanosti količina padalina i propusnosti tla s gustoćom izvora te određivanja izvora potencijalno ugroženih klimatskim promjenama. Zatim je provedeno praćenje 137 izvora te su utvrđene poveznice između hidrogeoloških uvjeta, temperature i pH vode te mehanizma izlaska vode na površinu. Utvrđen je i vrlo visok udio izvora koji su pod pritiskom stočarstva. Na deset relativno netaknutih, izoliranih izvora provedena je i analiza biološke raznolikosti te je potvrđena teza o njihovoj važnosti za bioraznolikost navedenoga područja.

Dobar primjer znanstvenoga istraživanja primjenjiva u upravljanju jest ono Siweka i Chełmiczkog (2004). Oni su u svojem istraživanju primijetili rast količine otopljenih tvari (eng. Total Dissolved Solids – TDS) u razdoblju od 1974. do 1999. kod izvora na području pogrđa Małopolska u južnoj Poljskoj. Istraživanjem lokalnih i regionalnih te antropogenih i prirodnih čimbenika pokušali su

odrediti uzrok pogoršanja kvalitete vode. Rezultati su pokazali da lokalni izvori zagađenja mogu značajno utjecati na promjene u kemijskom sastavu podzemne, a time i izvorske vode.

Primjer interdisciplinarnoga istraživanja koje obuhvaća gotovo sva najbitnija obilježja izvora – (hidro)geološka, hidrološka, hidrogeografska i ekološka – jest ono Schenka i suradnika (2018). Prilikom istraživanja izvora rijeke Verde u američkoj saveznoj državi Arizoni primijenili su sveobuhvatni, interdisciplinarni pristup. U svojem tehničkom izvještaju obradili su hidrološka obilježja, kao što su vrijednosti izdašnosti izvora, njihovi trendovi te ukupno bogatstvo prostora vodom. Povezuju fizikalno-kemijska obilježja vode, točnije EC, pH i temperaturu vode s nadmorskom visinom i litološkim obilježjima. Klasificirali su izvore na temelju Springera i Stevensa (2009) te proveli kratku analizu biljnih i životinjskih vrsta čije postojanje ovisi o izvorima.

Klasifikacije izvora

Početkom 20. stoljeća objavljeni su radovi koji donose temeljne spoznaje o izvorima i njihove prve klasifikacije. Keilhack (1912, prema Bryan 1919; Alfaro i Wallace, 1994) prvi pokušava uvesti sveobuhvatnu klasifikaciju izvora. Njegove klase izvora nisu se međusobno isključivale, a dijelio ih je prvenstveno na uzlazne i silazne, odnosno prema dominantnoj sili koja utječe na istjecanje vode na površinu. Najveći doprinos klasificiranju izvora i općenito istraživanju izvora u tom razdoblju dali su Bryan (1919) i Meinzer (1923). Većina kasnijih klasifikacija temelji se upravo na klasama i tipovima izvora ovih dvaju znanstvenika. Bryan (1919) donosi nekoliko vrsta klasifikacija izvora prema njihovim osnovnim obilježjima. Podijelio je izvore prema porijeklu vode u dvije osnovne skupine – izvore vode dubinskoga porijekla i izvore vode iz plitkih vodonosnika (meteorske vode). Svaka od navedenih kategorija dijeli se još na dodatne potkategorije izvora, ovisno o njihovim specifičnim obilježjima. Bryan također dijeli izvore i prema temperaturi vode na termalne i netermalne; prema slanoći na slane i neslane, prema količini mineralnih stvari na mineralne i obične; prema stalnosti na stalne, povremene i periodične. U svom radu spominje i opisuje zasebne vrste izvora kao što su gejziri, jezerasti izvori, kipteći izvori, itd.

Meinzer (1923) dijeli izvore u različite klase prema 11 kriterija: (1) obilježjima otvora kroz koji izlazi voda; (2) glavnoj sili koja vodu dovodi do površine; (3) litološkim obilježjima vodonosnika; (4) geološkom horizontu vodonosnika; (5) okruženju (okolici) u koju se voda ispušta; (6) količini

ispuštene vode (izdašnosti/protoku); (7) ujednačenosti tečenja; (8) trajnosti tečenja; (9) kakvoći vode; (10) temperaturi vode; i (11) ostalim obilježjima izvora.

Vjerojatno najvažnija i najkorištenija podjela izvora koju je uspostavio Meinzer jest ona prema količini ispuštene vode (izdašnosti) (6). Izvori su podijeljeni u 8 klasa, odnosno razreda vrijednosti količine vode koju izvor ispušta u jedinici vremena (Tab. 3.1). Bitno je istaknuti i Meinzerove podjele izvora prema ujednačenosti (varijabilnosti) tečenja (7) i stalnosti tečenja (8). Ujednačenost, odnosno varijabilnost definirao je kao omjer fluktuacije izdašnosti i prosječne izdašnosti. Izrazio ju je kroz formulu: $V = 100 \left(\frac{a-b}{c}\right)$, gdje je V varijabilnost izražena u postotku, a je maksimalna izdašnost, b je minimalna izdašnost i c je prosječna izdašnost. S obzirom na varijabilnost izvori se dijele na konstantne, čija varijabilnost prema navedenoj formuli ne prelazi 25 %; subvarijabilne, čija varijabilnost iznosi između 25 i 100 %; te varijabilne, s varijabilnošću većom od 100 %.

Tab. 3.1. Podjela izvora prema izdašnosti

Kategorija izvora	Izdašnost (L/s)
I	> 10 000
II	1000 – 10 000
III	100 – 1000
IV	10 – 100
V	1 – 10
VI	0,1 – 1
VII	0,01 – 0,1
VIII	< 0,01

Izvor: prema Meinzer, 1923.

U grupu temeljnih klasifikacija izvora treba dodati i one Clarkea (1924), Stinyja (1933) te Bornhausera (1913), Steinmanna (1915) i Thienemanna (1924). Clarke (1924) se bavi temom kemijskoga sastava izvorske vode, odnosno klasifikacijom izvora s pomoću analize kemijskoga sastava otopljenih iona. Mineralne izvore podijelio je na kloridne, sulfatne, karbonatne, kisele i ostale, s različitim sastavima. Još je važnije što je Clarke ponudio najbitnije kriterije prilikom klasifikacije izvora općenito, a to su redom po važnosti: geološka obilježja, potom fizikalna obilježja

vode i kemijska obilježja vode, što se podudara s načelima Bryanovih i Meinzerovih klasifikacija. Austrijski geolog Stiny (1933) podijelio je izvore u četiri kategorije, također s obzirom na (hidro)geološka obilježja izvora: izvori sa slobodnim otjecanjem (I), preljevni izvori (II), arteški izvori (III) i ostali izvori (IV). Posljednja kategorija izvora (IV) služila je za tipove izvora koji se ne mogu svrstati u prve tri kategorije (Stiny, 1933 prema Alfaro i Wallace, 1994).

Nešto drugačiju podjelu izvora uspostavio je Bornhauser (1913), a dopunili su je Steinmann (1915) i Thienemann (1924). Podijelili su izvore prema vrsti, odnosno obliku hidrološkog staništa koje tvori izvor. Definirali su tri osnovne vrste: reokrene, helokrene i limnokrene izvore.

U drugoj polovini 20. stoljeća autori se uglavnom bave regionalnim istraživanjima, oslanjajući se na spomenute osnovne klasifikacije s početka stoljeća. Također, javljaju se prve naznake interdisciplinarnosti, odnosno povezivanja podataka o izvorima iz različitih struka. Osim toga važno je istaknuti i razvoj digitalnih baza podataka i korištenje računala i automatskih klasifikacija. Jedan od tipičnih primjera razvoja klasifikacija početka 20. stoljeća jest Netopilov (1971). On se koristi Meinzerovom klasifikacijom izvora po varijabilnosti (ujednačenosti) izdašnosti kao bazom za razvoj vlastitih klasa. Služi se statističkim metodama u kojima uzima vrijednosti izdašnosti prisutnih 10 % i 90 % vremena umjesto ekstremnih vrijednosti kojima se služi Meinzer. Na temelju njihova odnosa razvio je 5 klasa (Tab. 3.2).

Tab. 3.2. Netopilova klasifikacija izvora prema varijabilnosti

Q₁₀/Q₉₀*	Kategorija izvora
1,0 – 2,5	Izvanredno ujednačeni
2,5 – 5,0	Dobro ujednačeni
5,0 – 7,5	Ujednačeni
7,5 – 10,0	Neujednačeni
> 10,0	Izvanredno neujednačeni

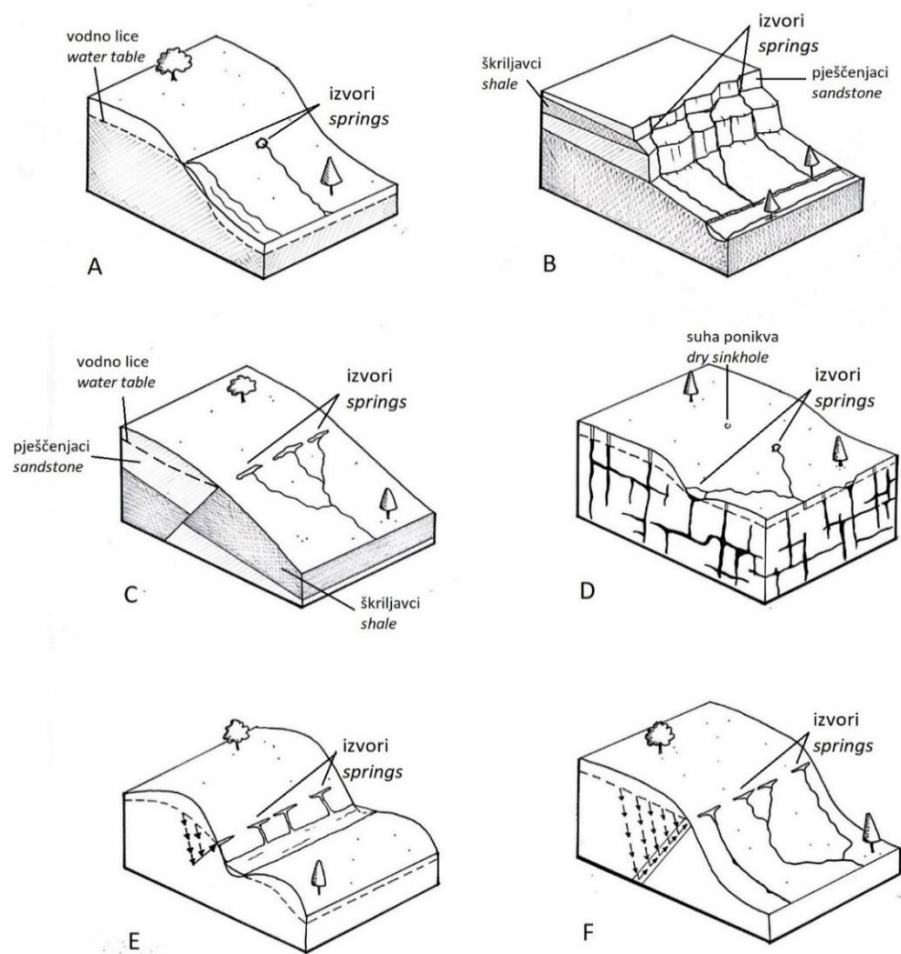
Izvor: Netopil, 1971 prema Alfaro i Wallace, 1994

*Q₁₀ – izdašnost koja je prisutna 10 % vremena, Q₉₀ – izdašnost koja je prisutna 90 % vremena

Iste godine Shuster i White (1971) analizirali su kemijska obilježja vode izvora s vapnenačkim vodonosnicima. Prema hidrogeološkim obilježjima podijelili su ih u dvije skupine – izvore difuznoga otjecanja i izvore koncentriranoga (cjevastoga) otjecanja, po uzoru na Bryana (1919). Usporedili su promjene u kemijskim obilježjima vode s tipovima izvora i pokazali kako izvori koncentriranoga otjecanja imaju veliku varijabilnost tvrdoće vode kroz godinu, dok je ona kod

difuznih izvora konstantnija. Slično njihovu istraživanju, Freeze i Cherry (1979) analiziraju izvore prema kemijskom sastavu, povezujući rezultate s litološkim sastavom vodonosnika. Također, procjenjuju vrijeme zadržavanja vode u podzemlju kod analiziranih izvora na temelju kemijskih obilježja.

Fetter (1980) spominje Bryanove i Meinzerove klasifikacije prema stalnosti tečenja te posebnu pažnju pridaje podjeli izvora prema geološkim obilježjima. Na temelju njihovih načela razradio je i definirao 6 tipova izvora prema geološkim obilježjima: a) depresijske izvore, b) kontaktne izvore, c) rasjedne izvore, d) ponikvaste izvore, e) preljevne izvore i f) izvore pukotinskih zona (Sl. 3.1).



Sl. 3.1. Klase izvora prema geološkim obilježjima prema Fetteru (A – depresijski izvori; B – kontaktni izvori; C – rasjedni izvori; D – ponikvasti izvori; E – preljevni izvori; F – izvori pukotinskih zona)

Izvor: Fetter, 1980

Dunne (1980) te nastavno na njegovo istraživanje Dietrich and Dunne (1993) opisuju i analiziraju morfološke početke korita (eng. *channel head*). Treba napomenuti da je međusobnu povezanost položaja izvora s mehanizmima podzemnih tokova prvi primijetio i opisao Solger (1931).

Ustanovljeno je kako je u vlažnijim krajevima početak korita vrlo često zapravo mjesto na kojem se nalazi stalni ili povremeni izvor, odnosno izvorišni obluk. Izvorišni obluk je manje ili više izraženi geomorfološki oblik unutar kojeg se nalazi izvor. Njegov oblik i veličina mogu biti različiti. Izvori dakle utječu na formiranje početaka korita, ali je točno mjesto izviranja vode često pod utjecajem padinskih procesa, kao što su kliženje i spiranje tla oko izvorišnog obluka. Dakle položaj izvora i početak korita međusobno utječu i ovise jedan o drugome, te se zbog stalnih procesa denudacije i akumulacije njihova morfologija i položaj mijenja.

Gerecke i Di Sabatino (1996) nadopunjuju i mijenjaju Steinmannovu i Thienemannovu klasifikaciju na primjerima izvora Sicilije. Definiraju tipove prema vrsti staništa koju izvor tvori, odnosno načinu otjecanja nakon dolaska vode na površinu. Limnokreni izvori tvore lokvu ili jezero nakon koje teče potok, a bogati su vodenom vegetacijom. Helokreni su izvori koji tvore močvarno stanište, koje nastaje difuznim istjecanjem i otjecanjem kroz blato, akumulirani materijal i organske ostatke. Reokreni izvori obično nastaju iz jedne točke izbijanja vode nakon koje se odmah tvori korito i tekućica. Reohelokreni izvori su prijelazni oblici između reokrenih i helokrenih izvora. Reopsamokreni su oni izvori kod kojih voda difuzno istječe kroz akumulirani materijal sastavljen pretežno od pijeska i šljunka. Zadnji tip čine izvori u obliku vodoskoka, kod kojih voda uzlazno, okomito, izbija na površinu. U svom istraživanju Gerecke i Di Sabatino (1996) analiziraju sastav beskralješnjaka prema navedenim tipovima izvora. Zaključuju da je prisutnost određenih vrsta u izvorima određena tipom izvora, ali i ostalim prostornim čimbenicima, kao što je primjerice nadmorska visina.

Krški izvori ranije su često izdvajani kao posebne kategorija izvora. Ističu se po svojoj relativno velikoj izdašnosti (Dukić, 1984). Međutim, zbog svoje raznolikosti i fenomena krškoga okoliša možemo razlikovati nekoliko posebnih vrsta krških izvora, odvojeno od do sada spomenutih podjela. Gams (1974), koristeći se podjelom Maksimoviča (1969), dijeli krške izvore prema procesu oblikovanja te prema prostoru na kojem se pojavljuju na 15 tipova. Posebnu pozornost pridaje vruljama i estavelama, koje dijeli na jezerske i riječne te aluvijalne i rubne (Himmel, 1964 prema Gams, 1974).

Dukić (1984) objedinjuje dosadašnja znanja i definira 7 tipova krških izvora, uključujući i one podmorske. Vokliški izvori (naziv prema francuskom izvoru La Fontaine de Vaucluse) su jaki krški izvori iz kojih voda na kopno izlazi uzlaznim kanalima. Unatoč njihovoj velikoj izdašnosti u suhim

razdobljima nije čudno da poneki od njih presuše. Povremeni su izvori oni izvori koji teku određeno vrijeme i onda naglo presuše. Prekidi i vrijeme tečenja mogu trajati od nekoliko minuta do nekoliko sati, a u vlažnijim razdobljima mogu i stalno teći. Estavele su tipovi izvora koji se javljaju u krškim poljima i koritima rijeka. U vlažnijem dijelu godine funkcioniraju kao izvori, dok su u sušem djelu godine kao ponori. Slana ili bočata vrela tipovi su izvora koji se javljaju na kopnu, tek nekoliko desetaka metara udaljeni od mora. Kroz podzemne pukotine dolazi do miješanja morske i slatke vode koja na koncu izbija na površinu. Vrulje su tip izvora ispod razine mora kroz koje izbija slatka ili bočata voda i obično se nalaze nedaleko od obale. Dva preostala tipa vrlo su slična vruljama, a to su morske vodenice i morske estavele (Dukić, 1984).

U zadnjih dvadesetak godina sve se više razvijaju interdisciplinarni pristupi klasifikacijama izvora. Pristupi koji povezuju obilježja izvora s gledišta različitih struka korišteni su za definiranje tipova izvora na lokalnim i regionalnim razinama. Istraživanja Zollhöfera i suradnika (2000), Martina i Brunkea (2012) te Spitalea i suradnika (2012) te de Moure i Felipea (2022) provedena su na različitim područjima, međutim koristila su sličan pristup. U navedenim istraživanjima su azvijene klasifikacije izvora temeljene na podjeli prema stanišnim tipovima Steinmanna i Thienemanna. Korištenjem abiotičkih čimbenika razvijene su tipologije specifične za istraživana područja, te je daljnjim istraživanjem potvrđena i biološka raznolikost između navedenih tipova.

Također se početkom XXI. Stoljeća javlja inicijativa određivanja globalnoga standarda za inventarizaciju i klasifikaciju izvora (Springer i dr., 2008; Springer i Stevens, 2009). Za razliku od prethodnih radova koji razvijaju klasifikacije izvora s obzirom na regionalna obilježja, cilj je znanstvenika *Instituta za upravljanje izvorima* u Arizoni, SAD razviti sustav prikupljanja podataka o obilježjima izvora te predložiti sveobuhvatnu klasifikaciju izvora primjenjivu na globalnoj razini. Na potrebu za globalnom klasifikacijom i bazom podataka upozorili su već ranije Alfaro i Wallace (1994). Prijedlog osnovne klasifikacije, primjenjive na globalnoj razini, iznesen je u nekoliko radova (Springer i dr., 2008; Springer i Stevens, 2009; Stevens i dr., 2021). Na temelju odabranih geoloških, hidroloških i ekoloških obilježja određeno je 12 oglednih tipova izvora. Bitno je napomenuti da su iz ove klasifikacije izuzete tzv. pištaline (eng. *seepage springs*), odnosno procijedni izvori relativno male izdašnosti i kratka zadržavanja vode u podzemlju. Tipovi izvora definirani su na temelju okruženja u kojem se nalaze, odnosno koje oblikuju (Tab. 3.3).

Tab. 3.3. Tipovi izvora prema Springeru i Stevensu i njihovi opisi

Tip izvora	Opis
Špiljski	Pojavljaju se u špiljama na izrazito okršenom prostoru, s dovoljno velikim provodnikom.
Izloženi	Otvori u špiljama, stijenama ili ponikvama gdje je otvoreni vodonosnik izložen površini tla.
Arteški	Arteški izvori gdje voda obogaćena CO ₂ izbija poput vodoskoka pod tlakom iz zatvorenoga vodonosnika.
Gejziri	Eksplozivni izvor vruće vode iz zatvorenoga vodonosnika.
Koncentrirani horizontalni	Tok vode izvire iz okomite stijene, iz otvorenoga vodonosnika.
Procjedni horizontalni	Tok manje snage obično izlazi vodoravno, duž geološkoga kontakta, preko ruba okomite stijene iz otvorenoga vodonosnika.
Helokreni	Voda izvire iz blago nagnuta močvarnoga područja; često morfološki neizraženi ili voda prodire iz više manjih otvora iz plitkoga, otvorenoga vodonosnika.
Padinski	Voda izlazi iz zatvorenoga ili otvorenoga vodonosnika na padini (nagib 30 – 60°); često morfološki neizraženi ili voda izlazi iz više manjih otvora.
Hipokreni	Ukopani izvor gdje voda ne doseže površinu, obično zbog vrlo niske izdašnosti i jake evapotranspiracije.
Limnokreni	Jezerasti ili lokvasti izvori zatvorenih i otvorenih vodonosnika.
Oblik humka	Voda izlazi iz mineraliziranoga humka, često na magmatskim ili rasjednim sustavima.
Reokreni	Voda koja izvire otječe tvoreći jedno ili više korita.

Izvor: Springer i Stevens, 2009

Istraživanja izvora u Hrvatskoj

Hrvatska je zemlja relativno bogata vodnim resursima (Čanjevac i Orešić, 2020), a izvori imaju značajnu ulogu u vodoopskrbi (Orešić i Čanjevac, 2020). Osim vodoopskrbe izvori se u Hrvatskoj koriste u zdravstvu (toplice) te se sve više i turistički vrednuju (npr. atraktivni izvori Une, Cetine, Krke

i dr.). Oko 50 % površine Hrvatske krški je prostor. Krški izvori u Hrvatskoj relativno su bogati vodom i čine atraktivne pojave u prostoru, stoga ne čudi da se većina istraživanja bavi upravo njima. Nekrški izvori uglavnom su znanstveno manje proučavani, s iznimkom onih koji su izravno zahvaćeni i uključeni u sustav vodoopskrbe. Istraživanja izvora u Hrvatskoj od početka 20. stoljeća do danas orijentirana su na atraktivne i izdašne pojave krških izvora. O tome govori i podatak da u republici Hrvatskoj postoje tri hidrološka spomenika prirode, a to su upravo krški izvori (vrela) rijeke Kupe, rijeke Une te rijeke Cetine.

Zbog svojega značaja i posebnosti, prostor današnjega Nacionalnog parka Plitvička jezera oduvijek je privlačio brojne istraživače. Franić već 1910. opisuje morfologiju i neka hidrološka obilježja izvora Crne i Bijele rijeke, potoka Plitvice, ali i ostale izvore na području današnjega nacionalnog parka (Franić, 1910). Petrik (1958) je prvi mjerio i analizirao hidrološka obilježja na području cijeloga hidrološkog sustava Plitvičkih jezera, uključujući i neke izvore, a na njegova istraživanja nadovezuje se Riđanović (1976) koji spominje da su izvori nedovoljno istraženi te je priložio kartografski prikaz položaja izvora oko Plitvičkih jezera. Prva mikrobiološka i kemijska istraživanja izvorske vode na području Plitvičkih jezera počela su 1950-ih godina (Vurnek i dr., 2016). Među najvažnijim su istraživanjima ona koja su proveli Emili (1965) te Pavletić i Matoničkin (1967). O utjecaju hidrogeoloških i strukturnih geoloških obilježja na pojavljivanje izvora na području NP Plitvička jezera pisao je Polšak (1974). Kempe i Emeis (1985) analiziraju fizikalno-kemijska obilježja vode Plitvičkih jezera, pa tako i izvora Crne i Bijele rijeke.

Osim istraživanja na Plitvičkim jezerima bitna zabilježena istraživanja izvora kroz 20. stoljeće odvijala su se i u Istri. Veronese (1939., prema Bonacci i Magdalenić, 1993) spominje trasiranja i istraživanja izvora u Istri u svrhu izgradnje vodoopskrbne mreže. Nizovi trasiranja i hidroloških istraživanja, posebno u svrhu iskorištavanja izvora za vodoopskrbu, na području Istre obavljala su se od 1960-ih godina nadalje (Tomašić, 1962 prema Magdalenić i dr., 1995; Gulić, 1973; Magdalenić i dr., 1986; 1987; Oštrić, 2018). Kao primjere istraživanja krških izvora u ostalim dijelovima Hrvatske možemo spomenuti ona vezana uz izvor Rječine (npr. Božićević, 1973; Božićević, 1974a; Biondić i dr. 1979), Zrmanje (npr. Bonacci, 1999), Krke (npr. Bonacci, 1985), Cetine (npr. Baučić, 1967), Omble (Mladenović i Uzunović, 1962). Najistaknutije izvore i vrulje južne Hrvatske kartografski prikazuje, a neke i opisuje Riđanović (1974), a sveobuhvatan prikaz najznačajnijih izvora Hrvatske prikazan je i na Hidrogeološkoj karti Republike Hrvatske 1:300 000 (Biondić i dr., 2003).

Suvremena istraživanja izvora od kraja 20. stoljeća i u 21. stoljeću nastavljaju se na dosadašnja istraživanja uz korištenje suvremene tehnologije i metodologije. I dalje su u primarnom fokusu krški izvori iako se javljaju i istraživanja izvora na nekrškim dijelovima Hrvatske. Treba napomenuti da se izvori uglavnom istražuju unutar širih istraživanja, kao sporedne pojave. Izvori se vrlo često spominju u istraživanjima kretanja podzemne vode. Biondić i dr. (2008) i Meaški (2011) donose u svojim radovima pregled trasiranja na području Nacionalnoga parka Plitvička jezera. Većina trasiranja provedena je 70-ih i 80-ih godina prošloga stoljeća. U svojim radovima koriste se rezultatima trasiranja za utvrđivanje hidrogeoloških cjelina, odnosno poriječja na području parka. Navedena trasiranja vezana su za izvore potoka Plitvice, Crne rijeke, Bijele rijeke, ali i ostale izvore na području parka i izvan njega. Osim određivanja njihovih slijevnih područja analiziraju i izdašnosti izvora te kemijska svojstva izvorske vode. Uključuju sve navedene podatke u prijedlog za održivo korištenje i zaštitu vodnih resursa i krških područja na primjeru Plitvičkih jezera.

Izvor Gradole jedan je od izdašnijih izvora na istarskom poluotoku i jedan od temelja vodoopskrbnoga sustava. Pregled trasiranja na području slijeva izvora Gradole donose Magdalenić i Vazdar (1993). Trasiranja su pokazala izravne veze određenih zona poniranja i izvora Gradole. S pomoću tih veza određen je hidrogeološki slijev izvora Gradole (Magdalenić i dr., 1995) te su s obzirom na dokazane veze (ali i ostala obilježja prostora) određene zone sanitarne zaštite izvora (Magdalenić i dr., 1995; Mlinarić i dr., 2016).

Najbrojnija istraživanja krških izvora u Hrvatskoj odnose se na njihova hidrološka obilježja. Brojni znanstveni i stručni radovi analiziraju hidrološka obilježja krških izvora: Gradole (Bonacci, 1996; Rubinić i dr., 2015), izvor rijeke Une (Bonacci, 2018), izvor Rječine (Bonacci i dr., 2017), izvori potoka Rumina (Bonacci i dr., 2016; Denić-Jukić i dr., 2020) te rijeke Like i rijeke Gacke (Bonacci i Andrić, 2008; Fišić i dr., 2019). Uglavnom se u navedenim istraživanjima radi o analiziranju hidroloških obilježja, odnosno karakterističnih vrijednosti mjesečnih i godišnjih izdašnosti (protoka), analiziranju elemenata vodne bilance poput ovisnosti izdašnosti o padalinama, analiziranju temperature izvorske vode te izradi i analizi hidrograma. Hidrološka istraživanja imaju veliku važnost za hidrogeološka istraživanja krških područja, odnosno krških vodonosnika (Bonacci, 1993; 2001), ali čine i podlogu za interdisciplinarna istraživanja (Bonacci i dr., 2017). Na primjeru izvora Velikog i Malog Rumina (Bonacci i dr., 2016) analiziran je antropogeni utjecaj na promjenu hidroloških obilježja krških izvora. U ovom slučaju radi se o smanjenju izdašnosti, odnosno pada vrijednosti

niskih, srednjih i maksimalnih izdašnosti (protoka) uslijed ljudskih intervencija na slijevnom području izvora.

Osim izravnih antropogenih utjecaja krški su izvori pod utjecajem klimatskih promjena. Zbog toga su bitna istraživanja poput onoga Rubinića i suradnika (2015). Njihov rad bavi se analizom hidrološke suše na području Istre u 2012. godini, odnosno njezinu utjecaju na hidrološka obilježja izvora Bulaž, Sv. Ivan i Gradole. Zbog ekstremnih uvjeta krški izvori uključeni u vodoopskrbni sustav u poriječju Mirne imali su izrazito smanjenu izdašnost, što je dovelo do posebnih mjera redukcije vode na području Istarske županije. Na području Istre istraživani su i izvori Rakonek, koji je uključen u vodoopskrbni sustav Vodovoda Pula. Izvor je podzemnim tokovima povezan s poriječjem rijeke Pazinčice te se prilikom bujičnih epizoda na poriječju Pazinčice na njemu pojavljuje zamućenje (Radišić i dr., 2020). Parlov i dr. (2007) istraživali su hidrogeološka obilježja vodonosnika već spomenutog izvora Bulaž analizom recesijske krivulje hidrograma otjecanja. Dobiveni rezultati istraživanja smatraju se pouzdanim i vrlo točnim za praktične svrhe u vodoopskrbi.

Osim hidroloških i hidrogeoloških istraživanja krških izvora prisutna su i ona biološka. U novije vrijeme najzastupljenija su istraživanja zajednica vodengrinja u većim krškim izvorima Gorske Hrvatske i Dalmacije (Pozojević i dr., 2018a; 2018b; 2019; 2020). U radovima su identificirane nove vrste vodengrinja, određeno bogatstvo vrsta i gustoća populacija u odabranim izvorima te su praćeni okolišni čimbenici koji na njih utječu. Vrijedi istaknuti da se u navedenim istraživanjima uspoređuju razlike u zajednicama između limnokrenih i reokrenih krških izvora (Pozojević i dr., 2018a; 2020).

Osim istraživanja makrobeskralješnjaka radovi analiziraju mikrobiološku kakvoću izvorske vode, odnosno njezinu kvalitetu i pitkost (Crnković i Gobin, 2013). Na području Gorskoga kotara analizirana je kvaliteta vode za piće izvora Skrad 1, izvora rijeke Dobre i izvora Srednji jarak. Pokazalo se da su mikrobiološka obilježja istraživanih krških izvora osjetljiva na meteorološke uvjete, odnosno padaline, ali i na antropogeni utjecaj, odnosno blizinu naseljenih područja. Meaški i suradnici (2019) donose pregled osnovnih obilježja krških izvora Varaždinske županije uključenih u vodoopskrbni sustav. Analiziraju hidrogeološka obilježja prostora, odnosno vodonosnika izvora, vrijeme zadržavanja vode u podzemlju, vrijednosti izdašnosti izvora te razlike u oscilacijama njihove izdašnosti.

Vrlo važan rad za istraživanje izvora u Hrvatskoj bavi se inventarizacijom te osnovnim hidrološkim i fizikalno-kemijskim obilježjima vode izvora na području Parka prirode Žumberak – Samoborsko gorje (Vujnović, 2011). To je jedan od rijetkih radova koji uključuje inventarizaciju izvora te čiji su predmet

istraživanja gotovo svi izvori na istraživanom području, njih više od 800. Navedeno istraživanje metodološki je vrlo slično upravo ovome na Medvednici. U njemu je analizirana raspodjela izvora prema litostratigrafskim jedinicama i nadmorskoj visini te je prikazana raspodjela izdašnosti izvora i njihovih osnovnih fizikalno-kemijskih parametara. Ovakav tip istraživanja izvora pruža osnovne podatke o obilježjima izvora na istraživanom području, ali je i odlična osnova za buduća hidrološka, hidrogeološka te ostala istraživanja izvora i vodnih resursa kao i njihovu primjerenu zaštitu.

Istraživanje izvora na Medvednici

Izvori Medvednice do sada su bili relativno slabo istraživani. Pojedini izvori opisivani su i istraživani u sklopu istraživanja u kojima nisu bili primarni objekt istraživanja. Šikić, u Geološkom vodiču Medvednice (1995), opisuje povezanost izvora Ribnjak s ponirućim vodama potoka Pusti dol. Buzjak (2001) opisuje morfologiju spiljskog izvora Jambrišakovo vrelo na krškom prostoru Ponikava na jugozapadu Medvednice na temelju podataka Božičevića (1974b). Hidrogeološke karte Republike Hrvatske, točnije listovi Zagreb i Ivanić Grad te njihovi tumači (Brkić i Čakarun, 1998a; 1998b; Slišković i Šarin, 1999a; 1999b), donose pregled hidrogeoloških obilježja Medvednice i značajnih izvora tog područja, opisujući njihovu izdašnost, hidrogeološka obilježja vodonosnika i uvjete pojavljivanja s obzirom na hidrogeološka obilježja. Također su istaknuti izvori uključeni u vodoopskrbnu mrežu (Brkić i Čakarun, 1998b; Slišković i Šarin, 1999b). Martinić i suradnici (2019), kartirali su neke izvore potoka Črnomerec i ukratko opisali neka obilježja izvorske vode. Istraživanje izvora na jugozapadnom dijelu Medvednice dio je rada koji se bavi inventarizacijom hidroloških objekata na tom području (Brletić, 2017). U navedenom radu izvori su terenski inventarizirani, njihove geografske koordinate unesene su u GIS prostornu bazu podataka te su im pridružena fizikalno-kemijska obilježja vode, mjerena na terenu. Rezultati tog rada uvelike su pomogli prilikom kartiranja izvora na području potoka Mikulića u sklopu ovog istraživanja. Izvorima na istočnim obroncima Medvednice bave se Lovrić i suradnici (2017). Na temelju hidrogeoloških obilježja procjenjuju vrijednost zaliha pitke vode te istražuju kaptirane izvore i zdence koji se koriste ili su se koristili u vodoopskrbi. Analizirali su kemijski sastav vode te kemijska obilježja u svrhu procjene pogodnosti vode za piće. Smatraju da je potrebno održavati kaptirane izvore i zdence kako bi voda bila uporabljiva te da je nužna zaštita slijevnih područja izvora. Naglašavaju da osim iskorištenih vodnih resursa istraživani prostor ima još dodatnih neiskorištenih izvora koji bi mogli biti kaptirani. Kvalitetu

izvorske vode na Medvednici analizirali su Dekić i Hrenović (2017). Proveli su bakteriološku analizu odabranih izvora uz planinarske staze. Pokazali su kako nisu svi istraživani izvori u trenutku uzorkovanja bili prikladni za piće te zaključuju da je potrebno voditi sustavno praćenje kvalitete vode na izvorima. U sklopu stručnih elaborata koji su povezani s hidrološkim obilježjima Medvednice također se spominju izvori, točnije njihova izdašnost. Tako su primjerice u Elaboratu zaštite okoliša vezanom za opskrbu sustava za zasneživanje istraženi kaptirani izvori Hornjak i Tisova peć, odnosno opisana su neka njihova hidrološka obilježja i stanje kaptaža (Erdelez, 2019).

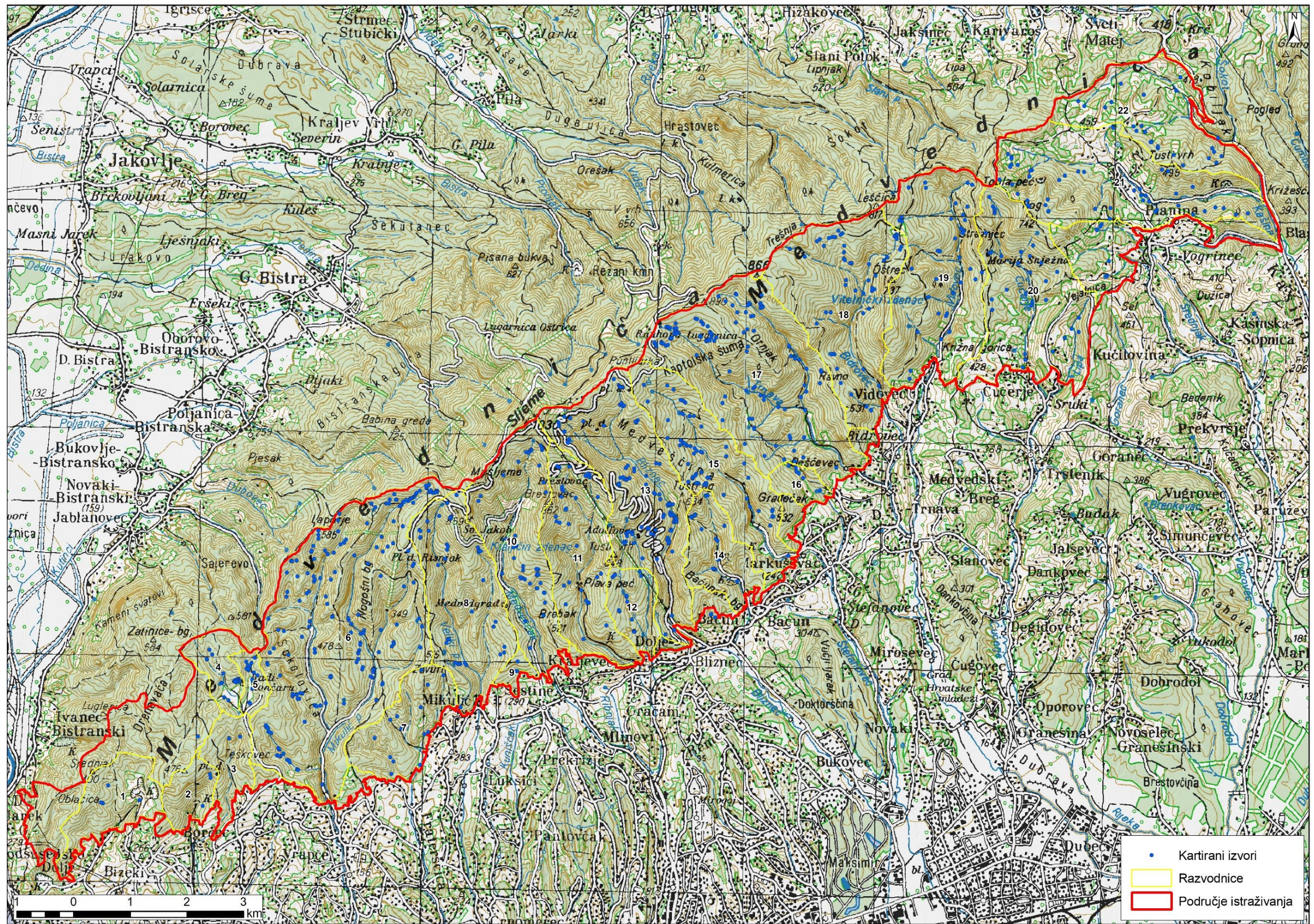
4. REZULTATI

4.1. Rezultati kartiranja – broj, gustoća i prostorni raspored izvora

Na istraživanom prostoru ukupno je kartirano 900 izvora (Sl. 4.1.1). Njihov broj znatno je veći nego što je to procijenjeno u Planu upravljanja PP Medvednica, gdje se navodi broj od oko 230 izvora na području cijelog parka (Plan upravljanja, 2009). S obzirom na površinu područja istraživanja od 85,45 km², prosječna gustoća izvora iznosi 10,53 izvora po km². Izračunate su prostorne gustoće izvora unutar istraživanog područja korištenjem metode gustoće točaka (*point density*) i metode jezgrene gustoće (*kernel density*). Prilikom korištenja obje metode definirane su veličine ćelija izlaznih rastera u rezoluciji 50 x 50 metara, dok je područje traženja izvora definirano na 1 km², odnosno u radijusu od 564 metra (Pahernik, 2012).

Rezultati obje metode prikazali su minimalne vrijednosti od 0 izvora po km². Najveća izmjerena vrijednost metodom gustoće točaka iznosila je 61,04 izvora po km², dok je najveća vrijednost izračunata metodom jezgre veća, te iznosi 82,99 izvora po km². Unatoč razlikama u metodi izračuna i u dobivenim vrijednostima prostorne gustoće, obje metode izdvajaju relativno ista područja s najvećom gustoćom izvora (Sl. 4.1.2; Sl. 4.1.3), kao i područja s najmanjom gustoćom izvora.

Na temelju izračunatih gustoća mogu se izdvojiti četiri žarišta pojave izvora. Prvo se nalazi na zapadnom dijelu istraživanog područja, na širem prostoru Ponikava. Drugo područje obuhvaća prostor uz greben Medvednice, odnosno najviše izvore potoka Mikulića i Velikog potoka (izvorišni krak potoka Črnomerec) koji se nalaze između planinarskih domova Risnjak i Grafičar. Treće i najveće područje zauzima središnji dio istraživanog prostora od Sljemenske ceste do Tustog brijega. Najveći dio pripada poriječju potoka Blizneca, te dijelom Markuševčkom potoku u prostoru Njivica i Tustog brijega. Četvrto i najistočnije područje nalazi se ponovno uz sami greben Medvednice i obuhvaća najviši izvorišni dio Starog potoka (izvorišni krak potoka Trnava), podno Hunjke.

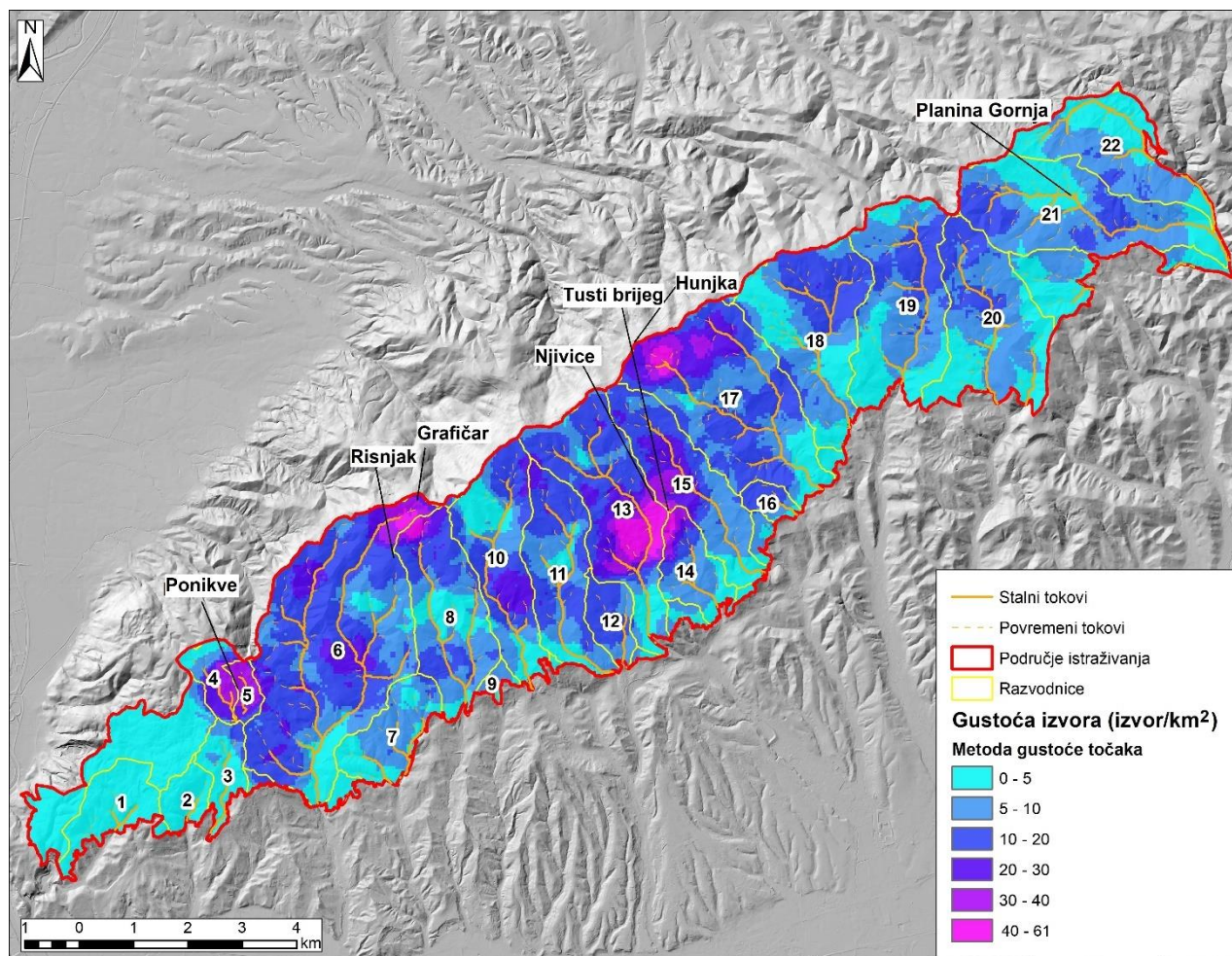


Sl. 4.1.1. Prostorni raspored izvora

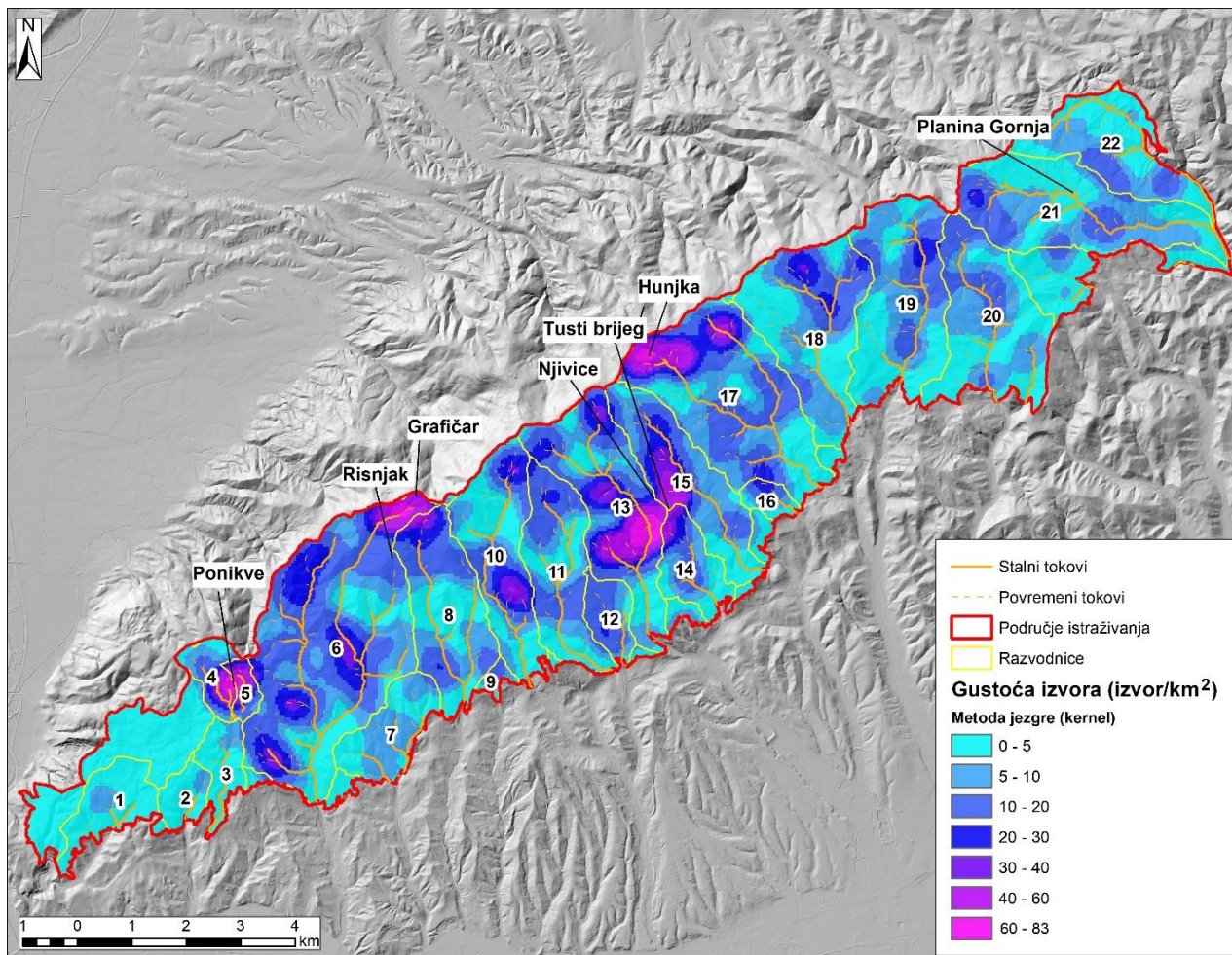
Na karti brojkama su označena poriječja potoka: 1 – Dolje; 2 – Dubravica; 3 – Mačkovec; 4 – Jezeranec; 5 – Javorščak; 6 – Vrapčak (i Mikulić); 7 – Kustošak; 8 – Črnomerec (Veliki i Mali potok); 9 – Kuniščak; 10 – Kraljevec; 11 – Pusti dol; 12 – Gračec; 13 – Bliznec; 14 – Bačun; 15 – Markuševac; 16 – Štefanovec; 17 – Trnava (Stari i Novi potok); 18 – Bidrovec; 19 – Vidovec; 20 – Čučerje; 21 – Vukov dol; 22 – Suhopot.

Podloga: Topografska karta 1:100 000 (DGU, 2024)

Kao područje s najmanjom prostornom gustoćom i brojem izvora izdvaja se krajnji jugozapadni dio Medvednice, sjeverno od Podsuseda, kao i dijelovi krajnjeg sjeveroistočnog dijela istraživanog područja, sjeverno od Planine Gornje. Ostali dijelovi s minimalnim vrijednostima gustoće vezani su uz rubne dijelove istraživanog područja, gotovo cijelom duljinom u blizini rubnih podsljemenskih naselja. Treba naglasiti kako su ta područja izraženija sjeverno od istočnih podsljemenskih naselja (npr. Bidrovec, Vidovec i Čučerje) nego središnjih i zapadnih (s iznimkom već spomenutog područja sjeverno od Podsuseda).

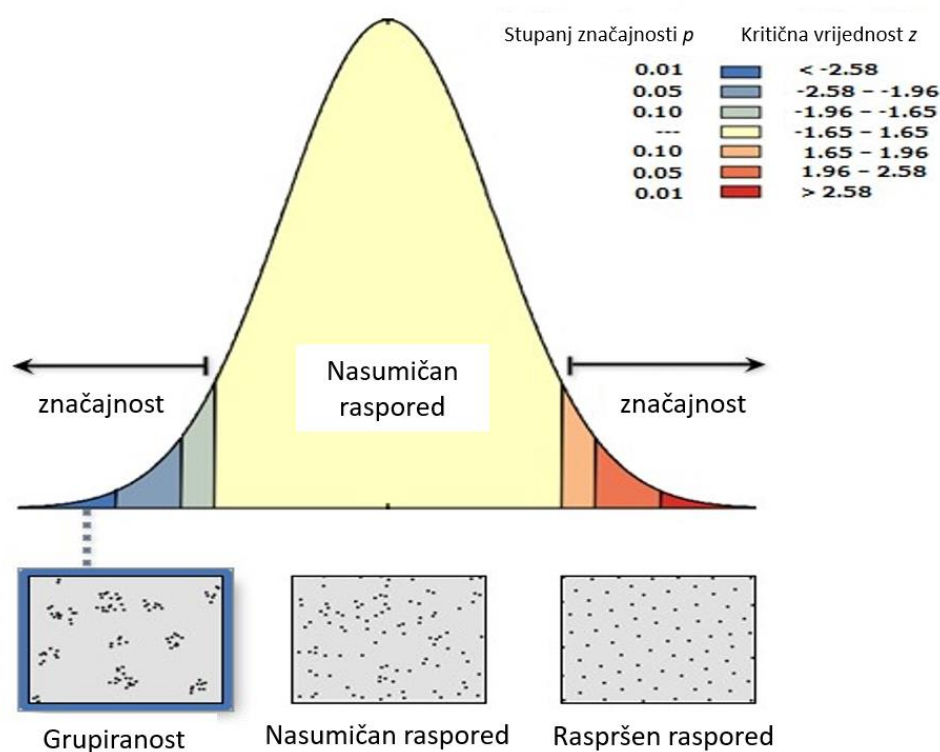


Sl. 4.1.2. Prostorna gustoća izvora izračunata metodom gustoće točaka (*point density*)
 Na karti brojkama su označena poriječja potoka: 1 – Dolje; 2 – Dubravica; 3 – Mačkovec; 4 – Jezeranec; 5 – Javorščak; 6 – Vrapčak (i Mikulić); 7 – Kustošak; 8 – Črnomerec (Veliki i Mali potok); 9 – Kuniščak; 10 – Kraljevec; 11 – Pusti dol; 12 – Gračec; 13 – Bliznec; 14 – Bačun; 15 – Markuševac; 16 – Štefanovec; 17 – Trnava (Stari i Novi potok); 18 – Bidrovec; 19 – Vidovec; 20 – Čučerje; 21 – Vukov dol; 22 – Suhopot.



Sl. 4.1.3. Prostorna gustoća izvora izračunata metodom gustoće jezgre (*kernel density*)
 Na karti brojkama su označena poriječja potoka: 1 – Dolje; 2 – Dubravica; 3 – Mačkovec; 4 – Jezeranec; 5 – Javorščak; 6 – Vrapčak (i Mikulić); 7 – Kustošak; 8 – Črnomerec (Veliki i Mali potok); 9 – Kuniščak; 10 – Kraljevec; 11 – Pusti dol; 12 – Gračec; 13 – Bliznec; 14 – Bačun; 15 – Markuševec; 16 – Štefanovec; 17 – Trnava (Stari i Novi potok); 18 – Bidrovec; 19 – Vidovec; 20 – Čučerje; 21 – Vukov dol; 22 – Suhopot.

Prostorni raspored izvora na cijelom području analiziran je i metodom *Average Nearest Neighbor* (*prosječni najbliži susjed*), pomoću koje je određen stupanj grupiranosti, odnosno raspršenosti izvora u prostoru. Izračunata kritična vrijednost z (*critical value*) pokazuje kako postoji manje od 1 % mogućnosti da je prostorni raspored izvora nasumičan, dok stupanj značajnosti p (*significance level*) iznosi $< 0,001$ (Tab. 4.1.1). Prosječna udaljenost između susjednih izvora iznosi 91,87 metara, dok je očekivana udaljenost 177,07 metara. Sukladno tome omjer udaljenosti najbližih susjednih izvora (*Nearest neighbor ratio*) iznosi 0,52 (Tab. 4.1.1). Navedeni rezultati pokazali su kako su izvori vrlo snažno grupirani (Sl. 4.1.4).



Sl. 4.1.4. Shematski prikaz rezultata analize grupiranosti izvora alatom *Average Nearest Neighbor* (iscrtkana plava linija i plavo naznačeni kvadratić predstavljaju rezultat; slika je izrađena automatski u programu ArcMap 10.7.)

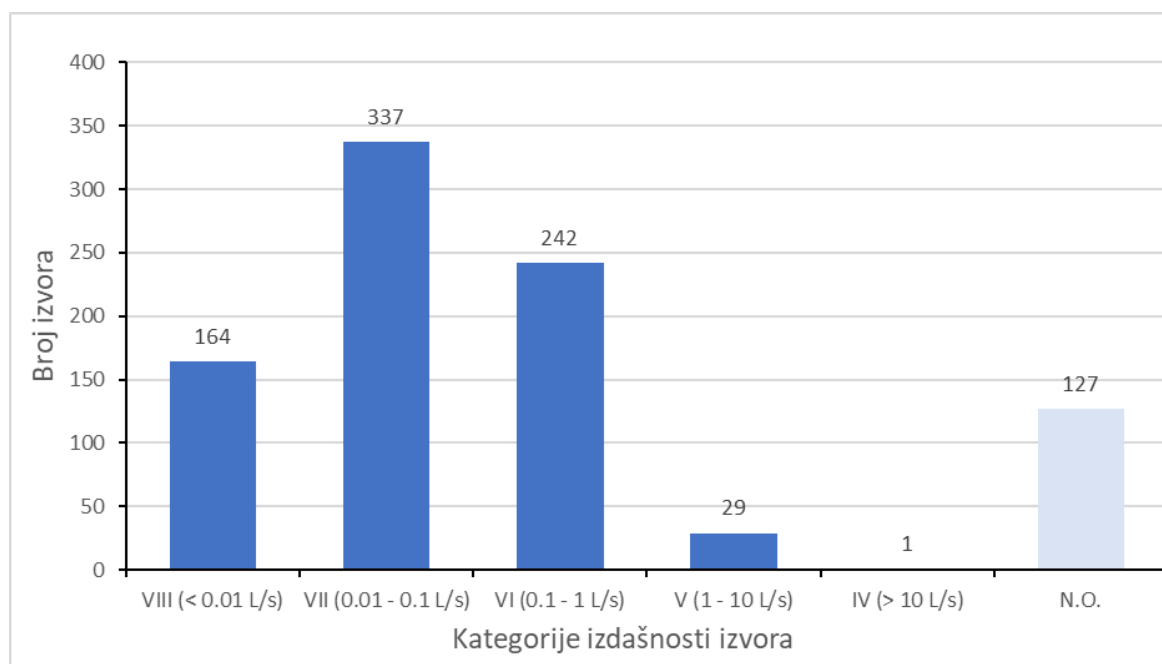
Tab. 4.1.1. Rezultati izračuna pokazatelja grupiranosti izvora alatom *Average Nearest Neighbor*

Prosječna udaljenost između najbližih izvora	Očekivana udaljenost između najbližih izvora	Omjer udaljenosti najbližih izvora	Kritična vrijednost z	Stupanj značajnosti p
91,87 m	177,07 m	0,52	-27,66	$< 0,001$

4.2. Hidrološka obilježja izvora

4.2.1. Kategorije izdašnosti

Volumetrijskim mjerenjem i procjenom hidroloških uvjeta u trenutku mjerenja određena je kategorija izdašnosti izvora. Zbog ukupnog broja izvora i veličine istraživanog prostora većini izvora izdašnost je mjerena samo jednom, što je potrebno uzeti u obzir prilikom tumačenja rezultata. Kategorija izdašnosti određena je za 773 izvora od 900 kartiranih. Za 127 izvora nije bilo moguće odrediti kategoriju izdašnosti (Sl. 4.2.1.1., kategorija N.O.), ponajviše zbog njihove nedostupnosti ili ekstremnih hidroloških uvjeta. Izvori kategorije VIII po Meinzeru (1923) s izdašnošću manjom od 0,01 L/s čine 21,64 % mjerenih izvora i ukupno ih je 164. Najveći broj izvora, njih 337 (44,46 %) pripada kategoriji VII, s izdašnošću između 0,01 i 0,1 L/s. Kategorija VI s izdašnošću izvora između 0,1 i 1 L/s druga je najzastupljenija. U nju su svrstana 242 izvora, odnosno njih 31,93 %. Za 29 (3,83 %) izvora procijenjena je izdašnost između 1 i 10 L/s. Samo jedan izvor (izvor potoka Dolje) svrstan je u kategoriju IV, s izdašnošću većom od 10 L/s.

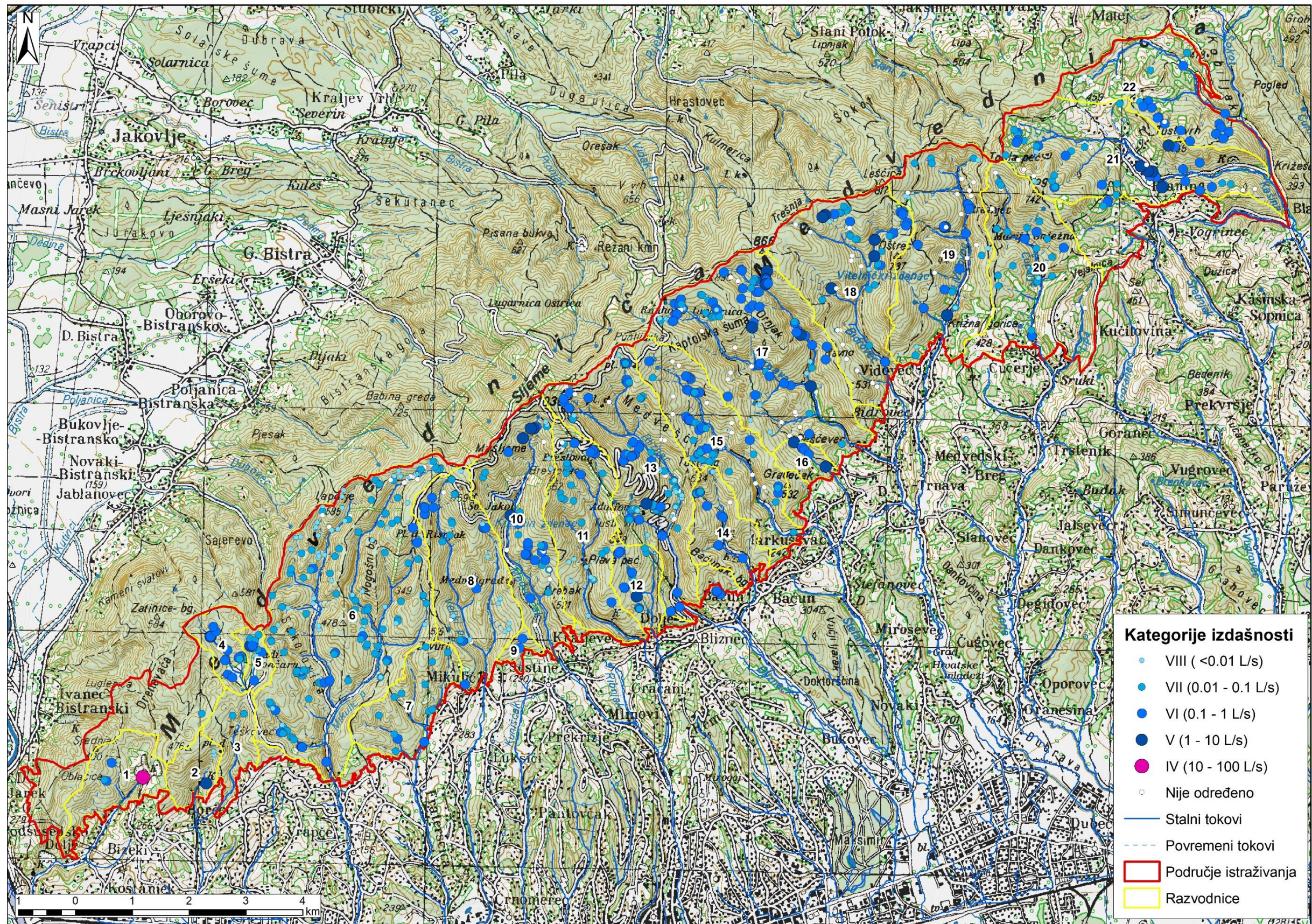


Sl. 4.2.1.1. Izvori prema kategorijama izdašnosti po Meinzeru (1923) (N.O. – nije određeno)

Prostorni raspored različitih kategorija izvora nije jednolik (Sl. 4.2.1.2; 4.2.1.3). Izvori kategorije VIII (< 0,01 L/s) prisutni su na cijelom istraživanom području, osim na krajnjem sjeveroistočnom dijelu. Može se uočiti da je njihova najveća koncentracija na području poriječja potoka Vrapčaka i potoka Mikulića na jugozapadnom dijelu, u središnjem dijelu doline potoka Blizneca te u vršnom izvorišnom

dijelu Starog potoka (potok Trnava). Izvori kategorije VII (0,01 – 0,1 L/s) nalaze se su u svim dijelovima istraživnog područja, iako se može uočiti da je njihov broj nešto veći na jugozapadnom (Vrapčak i Mikulić) i središnjem dijelu (Bliznec) (Sl. 4.2.1.2; Sl. 4.2.1.3).

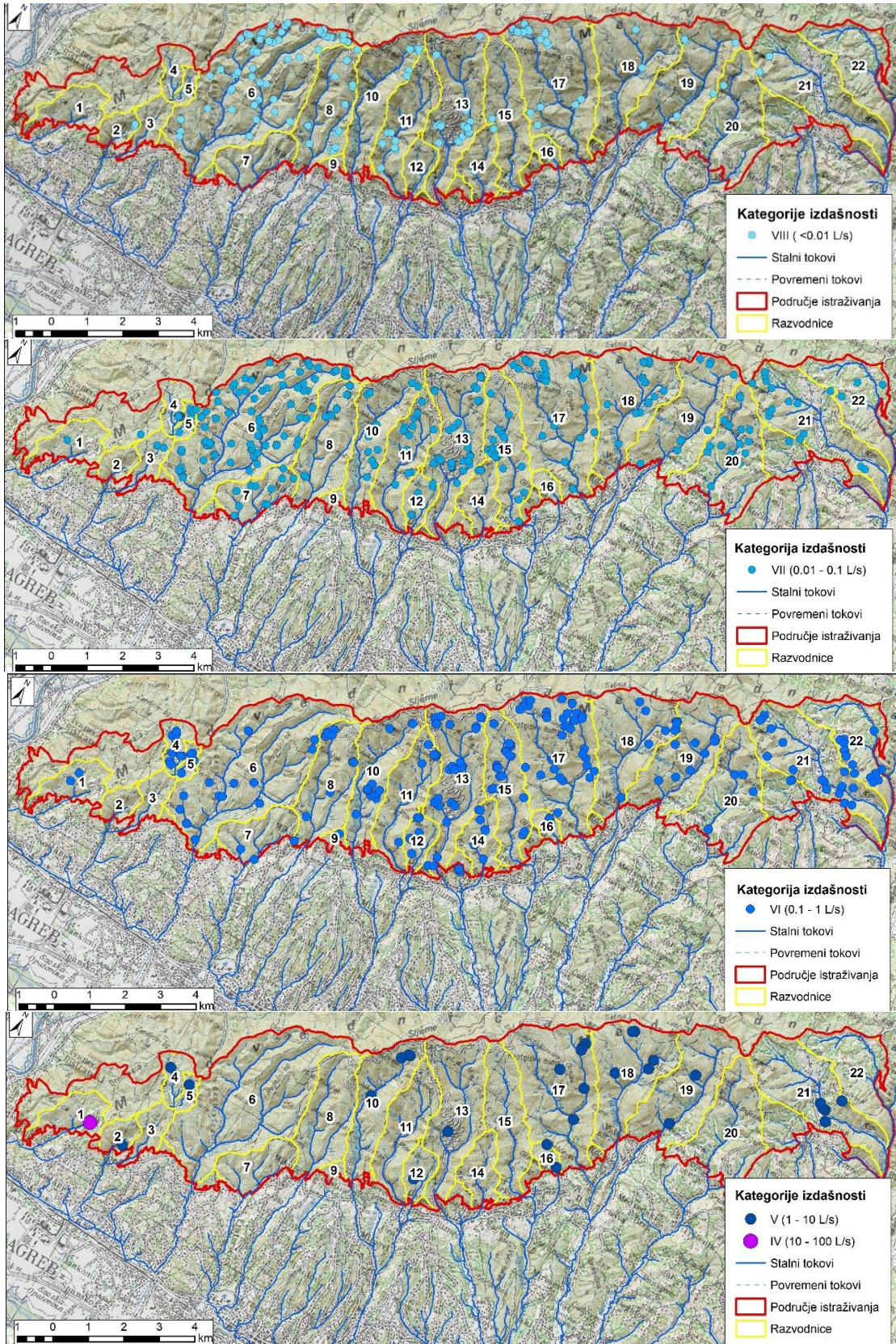
Izvori kategorije VI (0,1 – 1 L/s) također se nalaze na gotovo cijelom istraživnom području, međutim može se uočiti njihova najveća koncentracija na središnjem dijelu (Bliznec, Markuševac, Trnava), na području potoka Blizneca, kao i njihov izostanak na većem dijelu poriječja potoka Vrapčaka i Mikulića. Izvori kategorije V (1 – 10 L/s) manje su zastupljeni, ali je vidljiva njihov veći broj u poriječjima potoka Trnave, Bidrovca te Vukov dola. Nekoliko izvora ove kategorije nalazi se na poriječjima potoka Kraljevca, Gračeca i Vidovca, te na širem krškom području Ponikava. Izvori ove kategorije odsutni su kod potoka Vrapčaka, Mikulića, Črnomerca, Kustošaka, Pustog dola, Markuševca te Čučerske reke. Najači izvor, onaj kategorije VI (10 – 100 L/s) nalazi se podno kamenoloma Bizek, na samom jugozapadu istraživnog područja. Riječ je o zapuštenoj kaptaži izvora (Sl. 4.2.1.4) nakon koje teče potok Dolje (Sl. 4.2.1.2; Sl. 4.2.1.3).



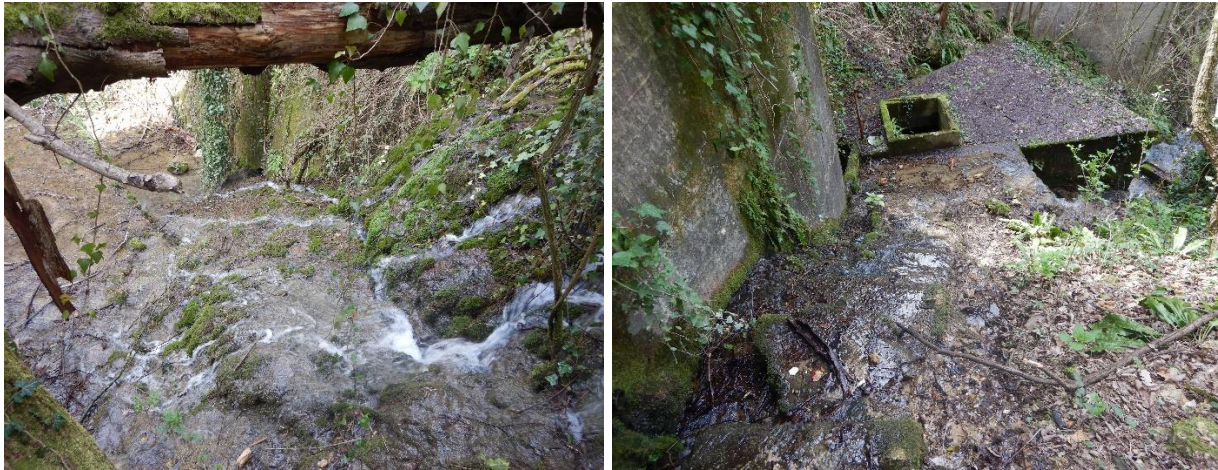
Sl. 4.2.1.2. Prostorni raspored izvora prema kategorijama izdašnosti

Na karti brojkama su označena poriječja potoka: 1 – Dolje; 2 – Dubravica; 3 – Mačkovec; 4 – Jezeranec; 5 – Javorščak; 6 – Vrapčak (i Mikulić); 7 – Kustošak; 8 – Črnomerec (Veliki i Mali potok); 9 – Kuniščak; 10 – Kraljevec; 11 – Pusti dol; 12 – Gračec; 13 – Bliznec; 14 – Bačun; 15 – Markuševec; 16 – Štefanovec; 17 – Trnava (Stari i Novi potok); 18 – Bidrovec; 19 – Vidovec; 20 – Čučerje; 21 – Vukov dol; 22 – Suhopot.

Podloga TK 1:100 000 (DGU, 2024)



Sl. 4.2.1.3. Prostorni raspored izvora po kategorijama izdašnosti (zasebno)
 Podloga: TK 1:100 000 (DGU, 2024)



Sl. 4.2.1.4. Izvor potoka Dolje ispod kamenoloma Bizek

Treba napomenuti kako postoje kaptirani izvori za koje nije bilo moguće odrediti njihovu izdašnost. Veći dio tih izvora nalazi se u središnjem i istočnom dijelu istraživanog područja (Brkić i Čakarun, 1998a; 1998b; Slišković i Šarin, 1999a; 1999b), a logično je da se radi o izvorima značajnije izdašnosti. Dio njih spojen je na lokalne sustave vodoopskrbe, pa većina ili sva voda tih izvora odlazi u sustav i ne izlazi na površinu. Dio kaptaza više nije u funkciji ili je u vrlo lošem stanju (oštećenja, zaraštenost biljem i sl.), zbog čega veći dio vode ipak teče prema potocima.

Jedan od primjera kaptiranih izvora je Tisova peć (Sl. 4.2.1.5) čija voda djelomično otječe prema Novom potoku (izvorišni krak potoka Trnava), a dio vode sustavom odlazi do precrpne stanice koja opskrbljuje akumulaciju Bistra, odnosno sustav za zasneživanje skijališta (Plan upravljanja, 2009; Prostorni plan, 2014; Erdelez, 2019). Isti sustav opskrbljuje se kaptiranim izvorom Hornjak, putem iste precrpne stanice. Izvor Hornjak (Sl. 4.2.1.5) nalazi se uz korito Starog potoka (izvorišni krak potoka Trnava) i nije bilo moguće procijeniti njegovu izdašnost. Prema dostupnim istraživanjima, procijenjuje se da ova dva izvora imaju prosječnu izdašnost veću od 10 L/s (Erdelez, 2019), a tome u prilog ide i tvrdnja na poučnoj ploči u blizini Gorskog zrcala, gdje je napisano da je izvor Tisova peć najizdašniji izvor na Medvednici. U trenutku kartiranja izvora Tisova peć (22. 9. 2022.), prema Novom potoku otjecalo je oko 1,5 L/s, te je njegova kategorija izdašnosti procijenjena na temelju tog mjerenja.



Sl. 4.2.1.5. Kaptirani izvori Tisova peć (lijevo) i Hornjak (desno)

4.2.2. Ostala hidrološka obilježja izvora

Kategorija izdašnosti samo je jedno od hidroloških obilježja izvora. Stalnost izvora, varijabilnost i režim izvora vrlo su bitna obilježja za čije određivanje nije dovoljno jedno ili dva mjerenja. Na temelju podataka prikupljenih ovim istraživanjem gotovo je nemoguće sa sigurnošću odrediti stalnost izvora. Dio izvora promatran je nekoliko puta, u različitim razdobljima te je primijećeno da neki od njih presušuju. Međutim, kako bi se odredila stalnost izvora i njihova potencijalna sezonalnost potrebno je dugogodišnje redovito praćenje njihovih obilježja. Dio izvora kategorije VIII po Meinzeru ($< 0,01 \text{ L/s}$) vjerojatno pripada povremenim izvorima, međutim teško je utvrditi njihov točan broj. Moguće je da i izvori izdašnijih kategorija presušuju, ali još nisu prikupljeni podaci koji bi to dokazali.

Stalnost izvora i ostala navedena obilježja stoga nisu određivana za sve izvore nego je na odabranim izvorima provedeno praćenje izdašnosti, zajedno s fizikalno-kemijskim obilježjima vode. Rezultati praćenja opisani su u poglavlju 4.7. Praćenje izvora.

4.3. Izvori i geološka obilježja prostora

4.3.1. Broj i gustoća izvora prema litostratigrafskim jedinicama

Prema Osnovnoj geološkoj karti u mjerilu 1:100 000 (OGK, listovi Zagreb i Ivanić Grad - Šikić i dr., 1997; Basch, 1981) analizirana su geološka obilježja istraživanog područja te je analiziran prostorni raspored izvora prema kartiranim litostratigrafskim jedinicama (Sl. 4.3.1.1). Istraživano područje sastoji se od 20 različitih litostratigrafskih jedinica. Slijedi njihov kronološki pregled i opis od najmlađeg prema nastarijem.

Holocenske potočne aluvijalne naslage (a)

Prostori holocenskih potočnih aluvijalnih naslaga na istraživanom području nalaze se na dvije lokacije. Prva je vezana za područje livade, Ponikve koje je zapravo malo krško polje (Buzjak, 2001) na jugozapadnom dijelu istraživanog područja, a druga, manja, za sjeveroistočni dio u dolinskom proširenju potoka Kašine (Šikić, 1995; Šikić i dr., 1977; 1979; Sl. 4.3.1.1). Njihova ukupna površina je 0,16 km², odnosno čine 0,18 % istraživanog područja, a debljina im ne prelazi 10 metara (Šikić i dr., 1979; Tab. 4.3.1.1).

Miocen (²M²₃; ²M^{1,2}₃; ¹M^{1,2}₃; ¹M¹₃; ²M²₂; ¹M²₂; ²M¹₂; ¹M¹₂)

Miocenske naslage zastupljene su u 8 različitih litostratigrafskih jedinica. Zajedno zauzimaju površinu od 20,09 km², odnosno 23,53 % istraživanog područja (Tab. 4.3.1.1). Njihova rasprostranjenost veže se uz krajnji sjeveroistočni dio istraživanog područja kao i jugozapadni dio te niže rubne dijelove uz podsljemenska zagrebačka naselja (Sl. 4.3.1.1). Na sjeveroistočnom dijelu dominiraju konglomerati, šljunci, pijesci, lapori i pješčenjaci te pločasti i litotamnijski vapnenci (litostratigrafske jedinice ¹M¹₂; ¹M²₂), koji su nataloženi na starije, paleozojske stijene (Basch, 1981; 1983; Šikić, 1995). Decimetarski uslojene vapnenačke stijene uglavnom se vežu za viša područja. Konglomerati su sastavljeni od slabo zaobljenih valutica različitih veličina (do 50 cm), a sastavljeni su i od pojedinih vrsta metamornih stijena koje danas nisu prisutne na Medvednici (Basch, 1983). Na jugozapadnom dijelu dominantni su organogeni i bioklastični (litotamnijski) vapnenci uz pješčenjake i lapore (²M²₂), koji leže na trijaskim karbonatnim (dolomiti) naslagama (Šikić, 1995; Šikić i dr., 1977; 1979). Miocenske naslage na kojima dominira litotamnijski vapnenac (²M²₂) imaju kavernožno-pukotinsku poroznost te su osrednje propusnosti. Vodonosnik je na ovim područjima okršen (Brkić i Čakarun, 1998a; 1998b; Slišković i Šarin, 1999a; 1999b). Na području litostratigrafskih jedinica ¹M¹₂ i ¹M²₂ prisutna je međuzrnska i

pukotinska poroznost. Vodonosnici su mjesitmični i prostorno ograničeni, a izdašnost i transmisivnost su slabi (Brkić i Čakarun, 1998a; 1998b; Slišković i Šarin, 1999a; 1999b; Sl. 4.3.1.2).

Paleogen (Pc)

Paleogenske, točnije paleocenske naslage prisutne su u relativno manjim površinama, kao oblici manjih erozijskih ostataka. Debljina naslaga ne prelazi 50 m te zajedno čine 0,33 % istraživanog područja (0,28 km²; Tab. 4.3.1.1). Vežemo ih za najviše (grebenske) izvorišne dijelove potoka Bidrovca, oko planinarskog doma Gorščica te potoka Vidovca oko Rumleca (Rumneca) (Basch, 1981; Sl. 4.3.1.1). Spomenute naslage građene su uglavnom od decimetarski uslojenih konglomerata, pješčenjaka i lapora, te u manjoj mjeri debelo uslojenih ili neuslojenih vapnenaca (Basch, 1981; 1983). Radi se o prostoru slabije propusnosti s međuzrnskom i pukotinskom poroznošću. Vodonosnici su mjesitmični i prostorno ograničeni, a izdašnost i transmisivnost su slabi (Brkić i Čakarun, 1998a; 1998b; Slišković i Šarin, 1999a; 1999b; Sl. 4.3.1.2).

Gornja kreda – gornji senon ($_{3,4}K^3_2$; K^3_2)

Gornjosenonske naslage ($_{3,4}K^3_2$) izgrađuju većinu poriječja potoka Vrapčaka i potoka Mikulića, te se pružaju sredinom poriječja potoka Črnomerca (Velikog i Malog potoka) i manjim dijelom potoka Kraljevca (Šikić, 1995; Šikić i dr., 1977; 1979; Sl. 4.3.1.1). Radi se o relativno velikom prostoru na zapadnoj polovici istraživanog područja, koji zauzima 8,81 km² (10,31 % istraživanog područja). Na istočnoj polovici, senonske naslage (K^3_2) izgrađuju više dijelove poriječja potoka Vidovca, te manje vršne dijelove poriječja potoka Čučerska reka i Vukov dola (Basch, 1981; 1983). Njihov udio u području istraživanja je 2,24 %, odnosno zauzimaju 1,92 km² (Tab. 4.3.1.1). Bazne naslage predstavljene su polimiktnim konglomeratima ili rjeđe brečama, čija je debljina do 20 metara. Na njima slijedi serija pločasto uslojenih vapnenaca, laporovitih vapnenaca te podređeno lapora. Ovi vapnenci odgovaraju tipu scaglia (Basch, 1983). Gornjosenonske naslage ($_{3,4}K^3_2$) imaju pukotinsku poroznost, stijene su propusne na plitkim dubinama ispod površine. Vodonosnici su prostorno ograničeni, a transmisivnost i izdašnost su vrlo slabi (Brkić i Čakarun, 1998a; 1998b; Slišković i Šarin, 1999a; 1999b). Senonske naslage (K^3_2) imaju međuzrnsku i pukotinsku poroznost, vodonosnici su mjestimični i ograničenih prostranstava. Izdašnost i transmisivnost su vrlo slabi (Slišković i Šarin, 1999a; 1999b; Sl. 4.3.1.2).

Gornja kreda (K₂)

Gornjokredne sedimentne naslage otkrivene su na području potoka Dolje, na krajnjem jugozapadnom dijelu istraživanog područja (Šikić i dr., 1977; Sl. 4.3.1.1). Sastavljene su od naslaga kalkarenita, rožnjaka i lapora (Šikić i dr., 1979). Njihov udio u istraživanom području je 0,27 %, odnosno zauzimaju 0,23 km² (Tab. 4.3.1.1). Na području ove litostratigrafske jedinice prisutna je pukotinska poroznost, stijene su propusne na plitkim dubinama ispod površine. Vodonosnici su prostorno ograničeni, a transmisivnost i izdašnost su vrlo slabi (Brkić i Čakarun, 1998a; 1998b; Sl. 4.3.1.2).

Gornja i donja kreda (K_{1,2})

Kredne naslage pješčenjaka, šejlova, lapora, rožnjaka i kalkarenita vezane su za sjeveroistočni dio Medvednice (Basch, 1981; 1983; Sl. 4.3.1.1). Na istraživanom području prisutni su njihovi manji izdanci uglavnom vezani uz greben Medvednice na sjeveroistoku. Ukupno zauzimaju manji dio istraživanog područja, samo 0,26 %, odnosno 0,22 km² (Tab. 4.3.1.1). Naslage gornja i donje krede (K_{1,2}) imaju međuzrnsku i pukotinsku poroznost, vodonosnici su mjestimični i ograničenih prostranstava. Izdašnost i transmisivnost su vrlo slabi (Slišković i Šarin, 1999a; 1999b; Sl. 4.3.1.2).

Gornja i donja kreda (ββ)

Magmatske stijene dijabaza i spilita pojavljuju se u obliku manjih proboja na području poriječja potoka Trnave na središnjem dijelu, te na višim područjima poriječja potoka Vidovca, Čučerske reke i Vukov dola (Basch, 1981; 1983; Sl. 4.3.1.1). Zajedno zauzimaju vrlo mali dio istraživanog područja, točnije 0,16 km², odnosno 0,18 % (Tab. 4.3.1.1). Naslage gornje i donje krede litostratigrafske jedinice ββ imaju pukotinsku poroznost, stijene su propusne na plitkim dubinama ispod površine. Vodonosnici su prostorno ograničeni, a transmisivnost i izdašnost su vrlo slabi (Brkić i Čakarun, 1998a; 1998b; Slišković i Šarin, 1999a; 1999b; Sl. 4.3.1.2).

Gornji trijas (T₃)

Gornjotrijaske naslage rasprostranjene su na krajnjem jugozapadnom dijelu istraživanog područja, zauzimajući dijelove poriječja potoka Dolje, potoka Dubravica te dio doline potoka Vrapčaka (Šikić i dr., 1977; Sl. 4.3.1.1). Većinom se sastoje od dolomita, dok se najmlađe naslage sastoje od izmjene dolomita, sivih vapnenaca i dolomitiziranih vapnenaca (Šikić, 1995; Šikić i dr., 1979). Gornjotrijaske naslage ukupno zauzimaju površinu od 2,58 km², odnosno 3,03 % površine istraživanog područja (Tab. 4.3.1.1). Gornjotrijaske stijene imaju kavernožno-pukotinsku poroznost i okršenost vodonosnika, iako su relativno slabo propusne (Brkić i Čakarun, 1998a; 1998b; Sl. 4.3.1.2).

Srednji trijas (T₂)

Naslage srednjeg trijasa također vežemo uz jugozapadni dio istraživanog područja, ali uz relativno više nadmorske visine. One tvore okršenu zonu sjeverno i istočno od Ponikava (Šikić i dr., 1977; Sl. 4.3.1.1). Naslage su većinski sastavljene od dolomita, ali i uložaka i proslojaka tamnosivih vapnenaca, šejlova, rožnjaka i piroklastita. Kod spomenutih vapnenaca često se opaža dolomitizacija i silifikacija, a neki su i pjeskoviti. Piroklastične stijene čine tufovi (Šikić, 1995; Šikić i dr., 1979). Srednjotrijaske naslage zauzimaju 2 % površine istraživanog područja, odnosno 1,7 km² (Tab. 4.3.1.1). Naslage srednjeg trijasa imaju kavernožno-pukotinsku poroznost i okršenost vodonosnika, iako su relativno slabo propusne (Brkić i Čakarun, 1998a; 1998b; Sl. 4.3.1.2).

Donji trijas (T₁)

Naslage donjeg trijasa zastupljene su s minimalnom površinom od 0,02 km², odnosno 0,02 % istraživanog područja (Tab. 4.3.1.1). Okružene su naslagama srednjeg trijasa (T₂) sjeverno od prostora Ponikava (Šikić i dr., 1977; Sl. 4.3.1.1), a sastavljene su uglavnom od pješčenjaka, silita, vapnenaca i dolomita (Šikić, 1995; Šikić i dr., 1979). Radi se o nepropusnim stijenama na kojima je transmisivnost i izdašnost praktički nikakva (Brkić i Čakarun, 1998a; 1998b; Sl. 4.3.1.2).

Devon, karbon – ortometamorfiti (D,C 2)

Ortometamorfiti devonske i karbonske starosti izgrađuju velik dio središnjeg dijela istraživanog područja. Najveća kontinuirana površina prostora se gornjim dijelovima poriječja potoka Kraljevec, Pustog dola, Blizneca i Markuševca, uključujući središnji dio grebena Medvednice (Basch, 1981; Šikić i dr., 1977; Sl. 4.3.1.1). Na jugu, istoku i sjeveroistoku postoje izolirana, ali površinom značajna područja ortometamorfita okružena parametamorfne stijenama iste starosti (Basch 1983; Šikić i dr., 1979; Šikić, 1995). Ukupno zauzimaju površinu od 15,51 km², odnosno 18,16 % istraživanog područja (Tab. 4.3.1.1). Dominantne stijene predstavljaju zeleni škriljavci nastali metamorfozom gabra i dijabaza (Basch 1983; Šikić i dr., 1979; Šikić, 1995). Ortometamorfiti imaju pukotinsku poroznost te su propusne samo na manjim dubinama. Vodonosnici su ograničenih prostranstava, a transmisivnost i izdašnost su vrlo slabi (Brkić i Čakarun, 1998a; 1998b; Slišković i Šarin, 1999a; 1999b; Sl. 4.3.1.2).

Devon, karbon – parametamorfiti (D,C 1)

Parametamorfiti su genetski sedimentne stijene koje su nejednako zahvaćene regionalnim metamorfizmom. Parametamorfne stijene devonske i karbonske starosti čine najveći dio središnjeg dijela Medvednice, odnosno istraživanog područja. Kontinuirano se pružaju od doline Vrapčaka na

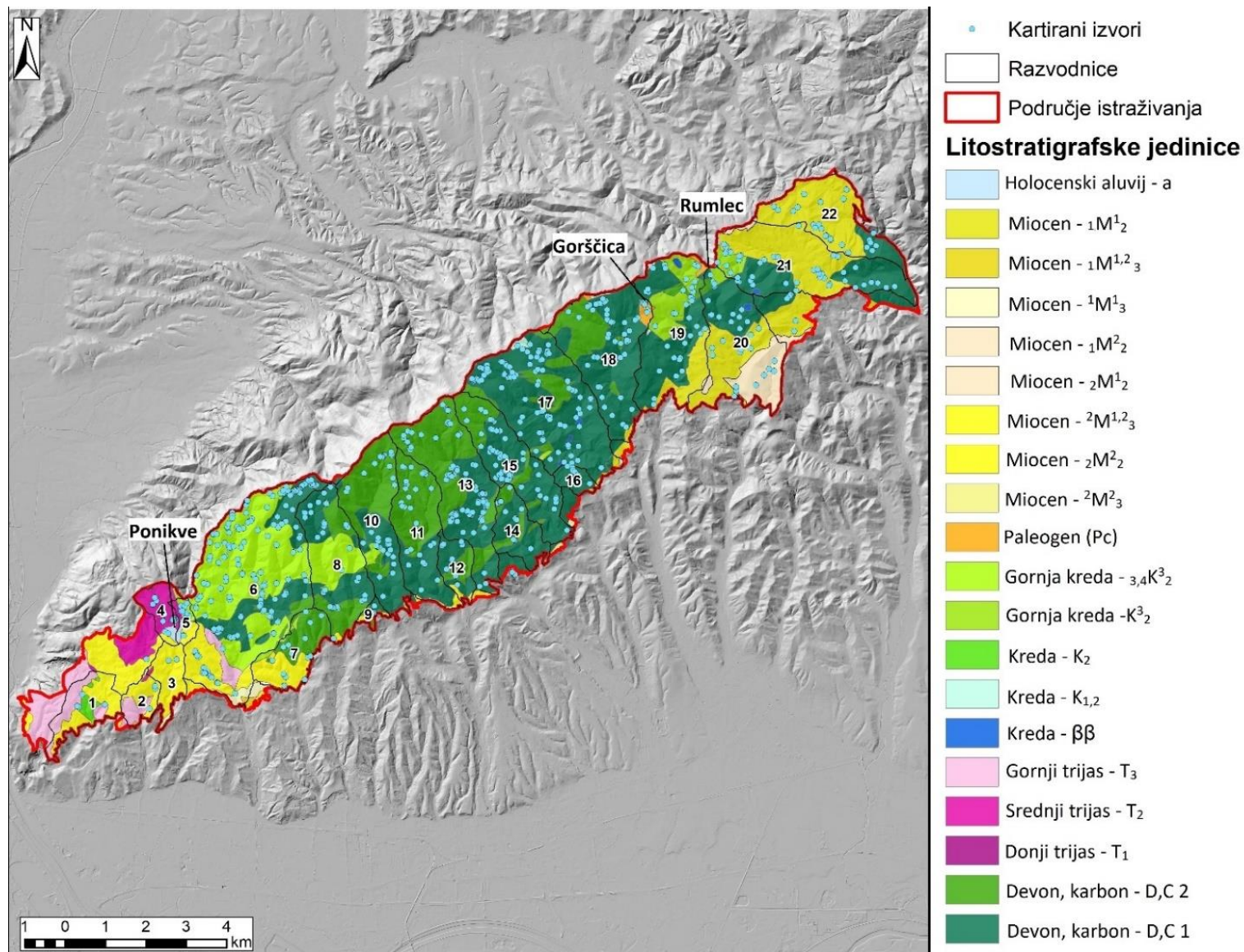
jugozapadu sve do potoka Vukov dol na sjeveroistoku (Basch, 1981; Šikić i dr., 1977; Sl. 4.3.1.1). Parametamorfiti zauzimaju 39,48 % istraživanog područja, odnosno 33,71 km² (Tab. 4.3.1.1). Dominantne parametamorfne stijene čine različite vrste škriljavaca (zeleni, sivozeleni, sivi, smeđi, pa sve do crnih), te u manjoj mjeri karbonatni mramori i mramorni škriljavci (Basch 1983; Šikić i dr., 1979; Šikić, 1995). Parametamorfne stijene ove litostratigrafske jedinice imaju raznolika hidrogeološka obilježja. Naslage mramoriziranih vapnenaca pukotinske poroznosti, koje se nalaze pretežno na nižim nadmorskim visinama središnjeg dijela te prema sjeveroistočnom dijelu istraživanog područja slabe su do osrednje propusnosti (Brkić i Čakarun, 1998a; 1998b; Slišković i Šarin, 1999a; 1999b). Naslage parametamorfita koje okružuju ortometamorfite središnjeg dijela te se nalaze i na sjeveroistočnom dijelu istraživanog područja sastavljene su pretežno od škriljavaca, siltitita, grauvaka i filita. To su nepropusne stijene gdje je transmisivnost i izdašnost gotovo nikakva (Brkić i Čakarun, 1998a; 1998b; Slišković i Šarin, 1999a; 1999b; Sl. 4.3.1.2). Na središnjem i jugoistočnom dijelu istraživanog područja ove naslage građene su od mramoriziranih vapnenaca te imaju srednju do osrednju propusnost te pukotinsku poroznost (Brkić i Čakarun, 1998a; 1998b; Slišković i Šarin, 1999a; 1999b; Sl. 4.3.1.2).

Broj i gustoća izvora prema litostratigrafskim jedinicama

Unutar nabrojanih litostratigrafskih jedinica analiziran je broj izvora i njihova gustoća. Pojedinačni rezultati za sve jedinice prikazani su u tablici 4.3.1.1. Izvori koji se na karti nalaze na samom kontaktu litostratigrafskih jedinica (22 izvora) izuzeti su iz analize. Razlog izuzimanja je taj što je zbog mjerila karte nedovoljno precizna granica između litostratigrafskih jedinica, te je nejasno kojoj litostratigrafskoj jedinici bi pripadao izvor. Najveći broj izvora nalazi se na litostratigrafskoj jedinici oznake D,C 1 (devonski i karbonski parametamorfiti). Ta litostratigrafska jedinica je najveća površinom, a na njoj se nalazi 464 izvora (Tab. 4.3.1.1). Gustoća izvora na toj litostratigrafskoj jedinici iznosi 13,47 izvora/km², što je iznad prosjeka svih kartiranih jedinica (10,28 izvora/km²). Drugi najveći broj izvora nalazi se na području litostratigrafske jedinice D,C 2 (devonski i karbonski ortometamorfiti), koja je druga po površini. Na tom području karitrano je 148 izvora, a gustoća izvora je 9,54 izvora/km², što je ispod prosjeka. Treći najveći broj izvora, točnije njih 110 (12,53 %) nalazi se na području litostratigrafske jedinice gornje krede oznake $_{3,4}K^3_2$. S obzirom na površinu, gustoća izvora na području ove litostratigrafske jedinice je veća od prosjeka i iznosi 12,48 izvora/km².

Na području stijena miocenske starosti (oznaka litostratigrafske jedinice ${}^1M^1_2$) nalaze se 53 izvora. S obzirom na relativno veliku površinu (10,54 km²), gustoća izvora ove litostratigrafske jedinice je relativno mala i iznosi 5,03 izvora/km². Ukupno 33 (3,76 %) izvora nalaze se unutar miocenske litostratigrafske jedinice oznake ${}^2M^2_2$, koju čine većinom vapnenačke stijene. Zbog relativno velike površine (7 km²), gustoća izvora na ovom području iznosi relativno niskih 4,72 izvora/km². Kartirana 23 izvora nalaze se na području dolomita srednjeg trijasa (T_2) i njihova gustoća na toj litostratigrafskoj jedinici iznosi 13,49 izvora/km². Na litostratigrafskoj jedinici gornje krede oznake K^3_2 nalaze se 22 izvora, a gustoća na toj litostratigrafskoj jedinici iznosi 11,49 izvora/km², što je više od prosjeka istraživanog područja (Tab. 4.3.1.1).

Na ostalim litostratigrafskim jedinicama pronađeno je manje od 10 izvora, što je u skladu s njihovim relativno malim površinama. Međutim treba izdvojiti litostratigrafsku jedinicu paleogena (Pc) gdje je izračunata najveća gustoća od svih jedinica i iznosi 24,94 izvora/km², ali i litostratigrafsku jedinicu dijabaza i spilita kredne starosti ($\beta\beta$) gdje je izmjerena gustoća od 19,17 izvora/km². Većina izvora tih litostratigrafskih jedinica nalazi se u blizini kontakta s drugim litostratigrafskim jedinicama, što ne čudi zbog njihove relativno male površine (Tab. 4.3.1.1). Na određenim litostratigrafskim jedinicama miocenske starosti (${}^2M^2_3$; ${}^2M^{1,2}_3$; ${}^1M^{1,2}_3$; ${}^2M^1_2$) te na području donjeg trijasa (T_1) ne nalazi se niti jedan izvor. Treba napomenuti kako su površine navedenih jedinica vrlo male (manje od 0,1 km²), zbog čega navedeno ne iznenađuje.



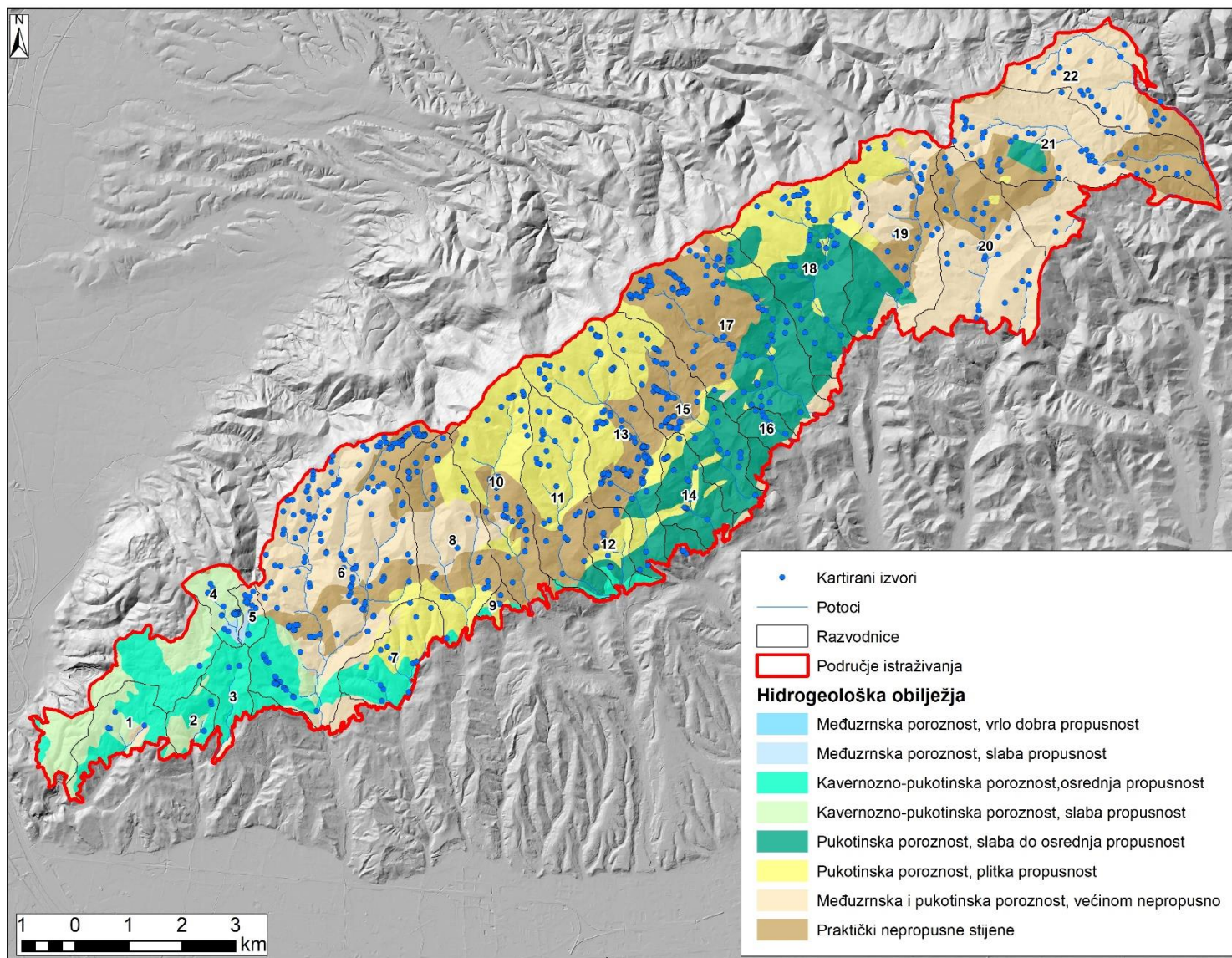
Sl. 4.3.1.1. Litostratigrafske jedinice istraživanog prostora i prostorni raspored izvora

Na karti brojkama su označena poriječja potoka: 1 – Dolje; 2 – Dubravica; 3 – Mačkovec; 4 – Jezeranec; 5 – Javorščak; 6 – Vrapčak (i Mikulić); 7 – Kustošak; 8 – Črnomerec (Veliki i Mali potok); 9 – Kuniščak; 10 – Kraljevec; 11 – Pusti dol; 12 – Gračec; 13 – Bliznec; 14 – Bačun; 15 – Markuševac; 16 – Štefanovec; 17 – Trnava (Stari i Novi potok); 18 – Bidrovec; 19 – Vidovec; 20 – Čučerje; 21 – Vukov dol; 22 – Suhopot.

Izvor: izrađeno prema Šikić i dr., 1977; Basch, 1981; Šikić, 1995

Tab. 4.3.1.1. Broj i gustoća izvora prema litostratigrafskim jedinicama

Oznaka na OGK	Starost	Vrste stijena	Broj izvora	Udio izvora (%)	Površina (km ²)	Udio površine (%)	Gustoća izvora (izvor/km ²)
a	Kvartar (Holocen)	Aluvij: šljunci, pijesci, gline	1	0,11	0,16	0,18	6,38
² M ₃	Miocen	Lapori, pješčenjaci	0	0	0,06	0,07	0,00
² M ^{1,2} ₃	Miocen	Lapori, pijesci, pješčenjaci	0	0	0,07	0,08	0,00
¹ M ^{1,2} ₃	Miocen	Vapnenci, lapori, pješčenjaci	0	0	0,08	0,09	0,00
¹ M ₃	Miocen	Lapori, vapnenci, pješčenjaci	1	0,11	0,45	0,53	2,21
₂ M ² ₂	Miocen	Vapnenci, lapori, pješčenjaci	33	3,76	7,00	8,20	4,72
₁ M ² ₂	Miocen	Konglomerati, lapori, pješčenjaci	6	0,68	1,86	2,18	3,22
₂ M ¹ ₂	Miocen	Konglomerati, šljunci, pijesci	0	0	0,03	0,04	0,00
₁ M ¹ ₂	Miocen	Konglomerati, šljunci, pijesci	53	6,04	10,54	12,34	5,03
Pc	Paleogen	Konglomerati, pješčenjaci, lapori i vapnenci	7	0,80	0,28	0,33	24,94
_{3,4} K ³ ₂	Kreda (gornja)	Konglomerati, breče, vapnenci	110	12,53	8,81	10,32	12,48
K ³ ₂	Kreda (gornja)	Konglomerati, vapnenci, lapori	22	2,51	1,92	2,24	11,49
K ₂	Kreda (gornja i donja)	Kalkareniti, rožnjaci, lapori	1	0,11	0,23	0,27	4,38
K _{1,2}	Kreda (gornja i donja)	Pješčenjaci, šejlovi, lapori	3	0,34	0,22	0,26	13,47
ββ	Kreda (gornja i donja)	Dijabazi i spiliti	3	0,34	0,16	0,18	19,17
T ₃	Trijas (gornji)	Dolomiti, podređeno vapnenci	3	0,34	2,58	3,03	1,16
T ₂	Trijas (srednji)	Dolomiti, podređeno vapnenci	23	2,62	1,70	2,00	13,49
T ₁	Trijas (donji)	Pješčenjaci, siliti, vapnenci	0	0	0,02	0,02	0,00
D,C 2	Devon, Karbon	Ortometamorfiti: škriljavci, gabri, dijabazi	148	16,86	15,51	18,16	9,54
D,C 1	Devon, Karbon	Parametamorfiti: škriljavci, grauvake, siliti, mramori	464	52,85	33,71	39,48	13,76
			878	100	85,45	100	10,32



Sl. 4.3.1.2. Hidrogeološka obilježja istraživanog prostora i prostorni raspored izvora

Na karti brojkama su označena poriječja potoka: 1 – Dolje; 2 – Dubravica; 3 – Mačkovec; 4 – Jezeranec; 5 – Javorščak; 6 – Vrapčak (i Mikulić); 7 – Kustošak; 8 – Črnomerec (Veliki i Mali potok); 9 – Kuniščak; 10 – Kraljevec; 11 – Pusti dol; 12 – Gračec; 13 – Bliznec; 14 – Bačun; 15 – Markuševec; 16 – Štefanovec; 17 – Trnava (Stari i Novi potok); 18 – Bidrovec; 19 – Vidovec; 20 – Čučerje; 21 – Vukov dol; 22 – Suhopot.

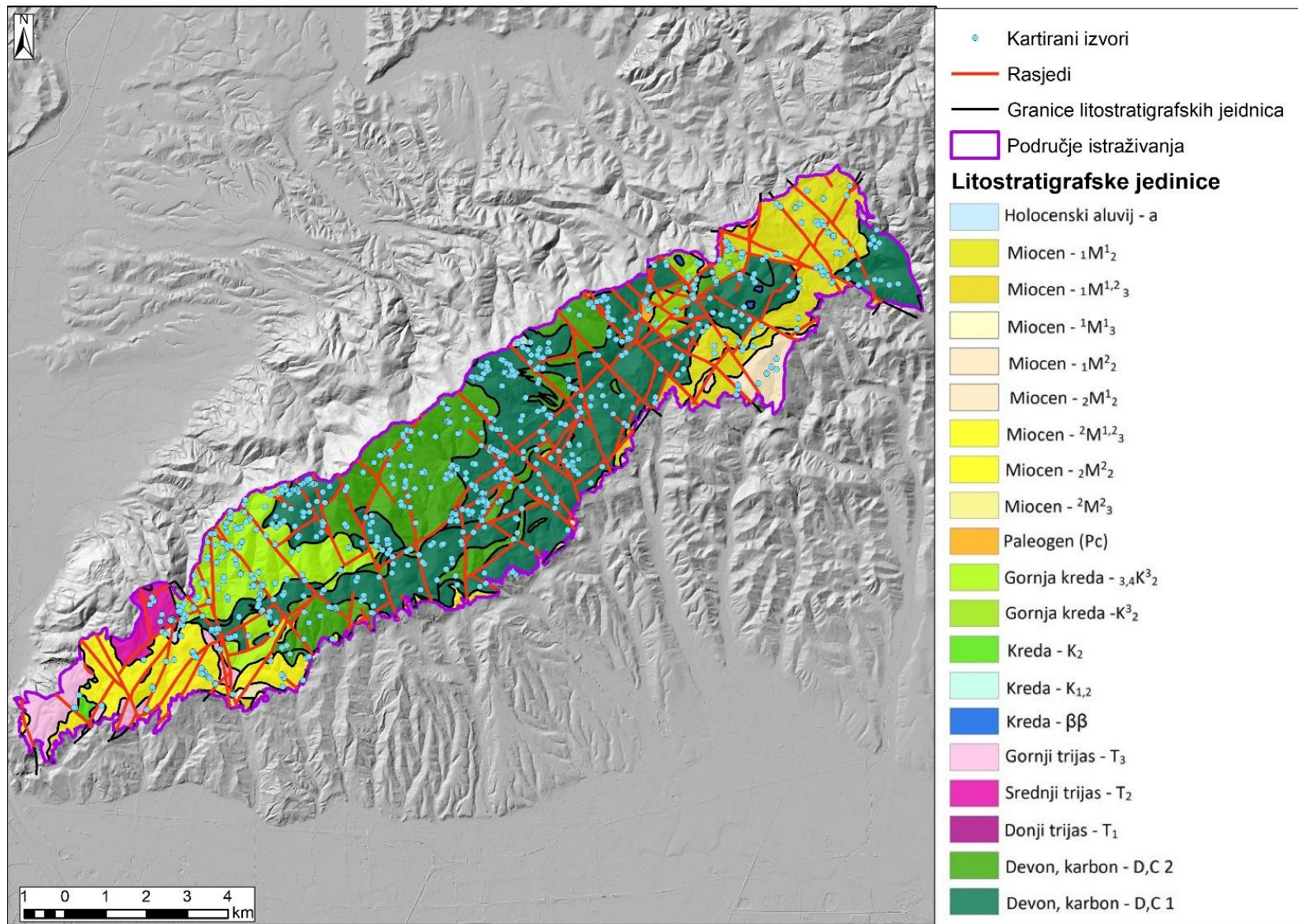
Izvor: izrađeno prema Šikić i dr., 1977; Basch, 1981; Šikić, 1995

4.3.2. Udaljenost izvora od rasjeda

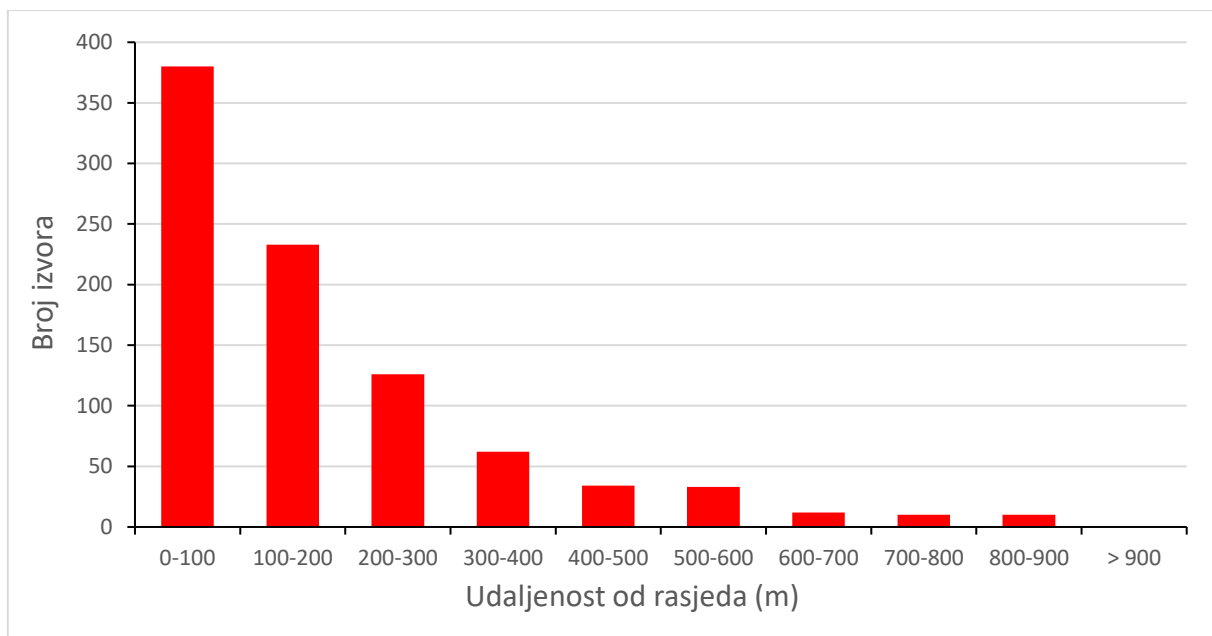
Pojavnost izvora često se veže uz rasjede, rasjedne zone i kontaktne zone (Rzonca i dr., 2008; Corsini i dr., 2009; Buczynski i Rzonca, 2011; 2018; Bense i dr., 2013). Položaj istraživanih izvora analiziran je s obzirom na udaljenost od rasjeda. Podaci o rasjedima preuzeti su s Osnovne geološke karte (OGK) 1:100 000, s listova Zagreb i Ivanić Grad (Šikić i dr., 1977; Basch, 1981; Sl. 4.3.2.1) te iz Geološkog vodiča Medvednice (Šikić, 1995). Treba napomenuti kako zbog mjerila karte podaci o rasjedima vjerojatno nisu potpuni, međutim oni su jedini dostupni u ovom trenutku. Rasjedi su digitalizirani u programu ArcMap u kojem je i provedena analiza udaljenosti izvora od rasjeda. Za svaki izvor automatski je pomoću alata *Near* izračunata minimalna pravocrtna udaljenost do najbližeg rasjeda. Prostor istraživanja podijeljen je na razrede raspona od 100 metara udaljenosti od rasjeda kako bi se dobila gustoća izvora. Najmanja udaljenost izvora od rasjeda iznosila je 0,89 metara, a najveća 854,78 metara. Prosječna udaljenost izvora od rasjeda iznosi 179,77 metara, a medijalna udaljenost iznosi 122,74 metra. Standardna devijacija udaljenosti iznosi 175,21 metar, a koeficijent varijacije 97,46 %.

Rezultati su pokazali kako se najveći broj izvora, njih 380 (42,22 %) nalazi na udaljenosti do 100 metara od rasjeda. S povećanjem udaljenosti od rasjeda, broj izvora pada (Sl. 4.3.2.2; Tab. 4.3.2.1). Tako se na udaljenosti od 100 do 200 metara od rasjeda nalazi 233 izvora (25,89 %), na udaljenosti od 200 do 300 metara 126 izvora (14 %), na udaljenosti od 300 do 400 metara od rasjeda 62 izvora (6,89 %; Sl. 4.3.2.2; Tab. 4.3.2.1).

Na udaljenostima od 400 do 500 metara od rasjeda nalazi se 34 izvora (3,78 %), a na udaljenostima od 500 do 600 metara 33 (3,67 %). Na udaljenostima od 600 do 700 metara pronađeno je 12 izvora, a na udaljenostima od 700 do 800 metara, odnosno 800 do 900 metara od rasjeda po 10 izvora u svakoj kategoriji (Tab. 4.3.2.1).



Sl. 4.3.2.1. Prostorni raspored izvora, rasjeda i granica litostratigrafskih jedinica
 izvor: izrađeno prema Šikić i dr., 1977; Basch, 1981; Šikić, 1995

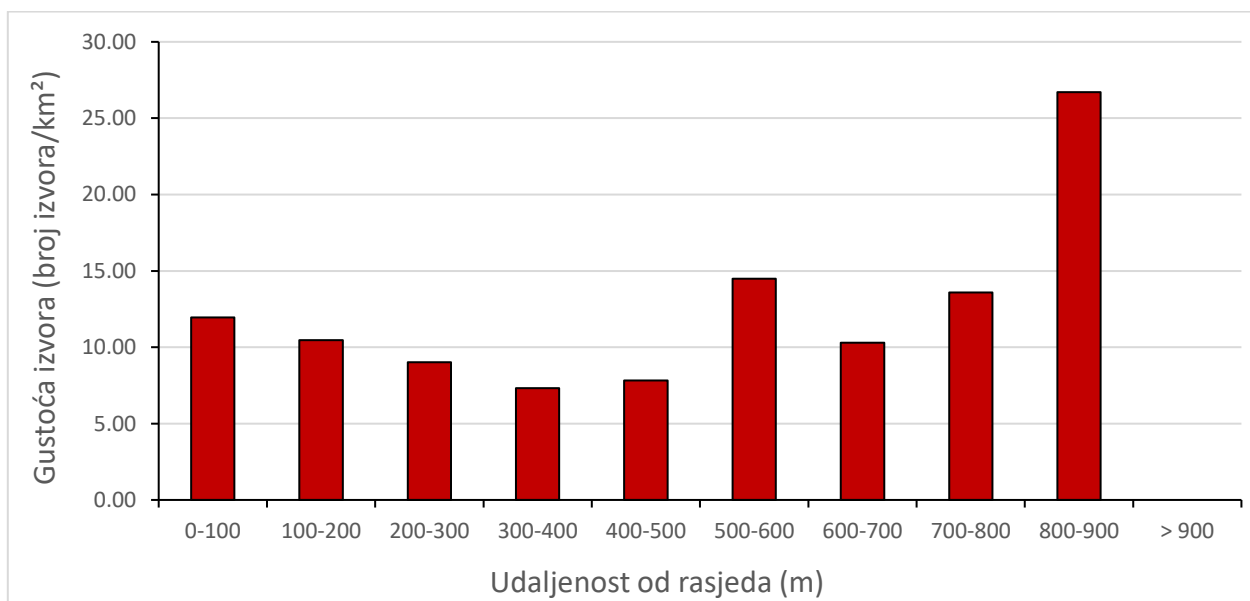


Sl. 4.3.2.2. Udaljenost izvora od rasjeda

Prema broju izvora u kategorijama udaljenosti od rasjeda čini se kako je najveći dio njih vezan upravo uz rasjedne zone. Međutim, usporedimo li broj izvora svakog razreda udaljenosti s njihovim površinama dobit ćemo gustoću raspodjele izvora prema udaljenosti od rasjeda. Rezultati su pokazali kako gustoća izvora varira s udaljenošću od rasjeda. U prve četiri kategorije, na udaljenostima do 400 metara, gustoća pada (od 11,96 izvora/km² do 7,33 izvora/km²), što je sukladno i trendu pada broja izvora s udaljenosti. Međutim, s daljnjim povećanjem udaljenosti od rasjeda zabilježen je i rast gustoće izvora, sve do kategorije od 500 do 600 metara udaljenosti gdje je zabilježena najveća gustoća izvora od 14,48 izvora/km²; Tab. 4.3.2.1; Sl.4.3.2.3). Gustoća zatim pada na udaljenosti od 600 do 700 metara na 10,31 izvor/km², a zatim ponovno raste sve do kategorije udaljenosti 800 do 900 metara gdje iznosi čak 26,72 izvora/km². Na udaljenostima većim od 900 metara od rasjeda nema izvora.

Tab. 4.3.2.1. Broj i gustoća izvora s obzirom na udaljenost od rasjeda

Udaljenost od rasjeda (m)	Broj izvora	Udio izvora (%)	Površina (km ²)	Udio površine (%)	Gustoća izvor (izvori/km ²)
0-100	380	42,22	31,77	37,19	11,96
100-200	233	25,89	22,26	26,05	10,47
200-300	126	14,00	13,97	16,35	9,02
300-400	62	6,89	8,46	9,90	7,33
400-500	34	3,78	4,34	5,08	7,83
500-600	33	3,67	2,28	2,67	14,48
600-700	12	1,33	1,16	1,36	10,31
700-800	10	1,11	0,74	0,86	13,59
800-900	10	1,11	0,37	0,44	26,72
> 900	0	0,00	0,09	0,10	0,00
ukupno	900	100	85,45	100,00	10,53



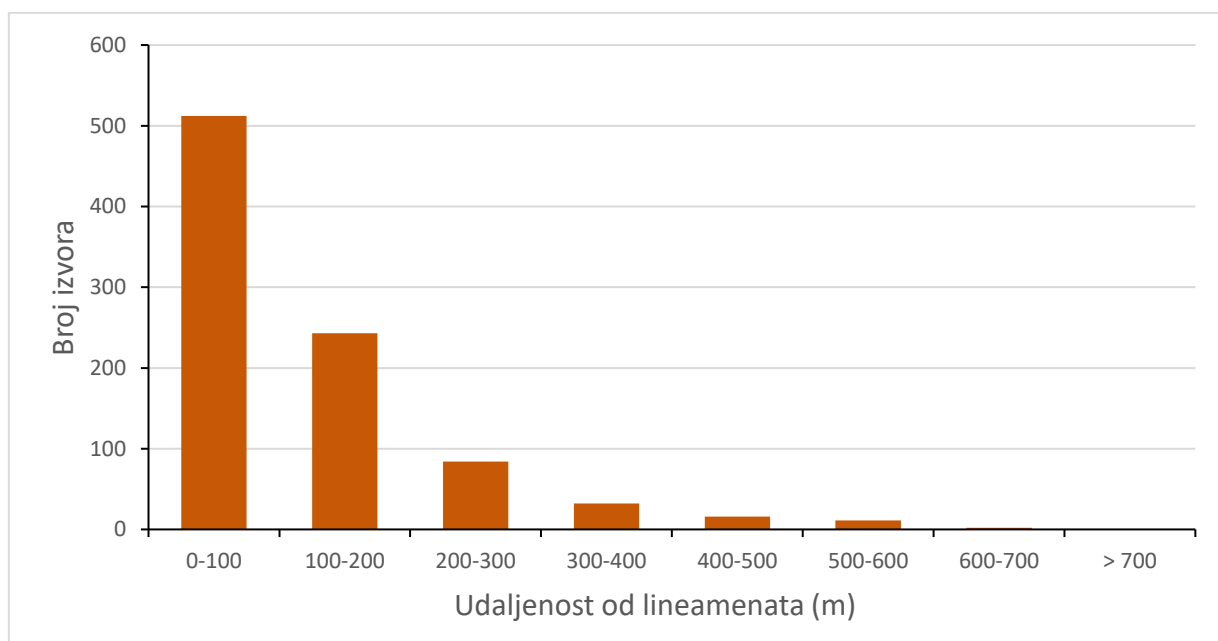
Sl. 4.3.2.3. Gustoća izvora prema udaljenosti od rasjeda

Osim udaljenosti od rasjeda, izvori su analizirani i s obzirom na udaljenosti od svih lineamenata (crta) na osnovnoj geološkoj karti (Šikić i dr., 1971; Basch 1981). Pod lineamente su uz rasjede uključene sve vrste kontakata i granica kartiranih jedinica. Korištenjem iste metode kao i kod udaljenosti od rasjeda svakom izvoru izmjerena je udaljenost od najbližeg lineamenta. Prostor istraživanja podijeljen je na dijelove od po 100 metara udaljenosti od lineamenata kako bi se dobila gustoća izvora. Najmanja udaljenost izvora od lineamenata iznosila je 0,32 metara, a najveća 623,39 metara. Prosječna

udaljenost izvora od lineamenata iznosi 115,99 metara, a medijalna udaljenost iznosi 82,79 metara. Standardna devijacija udaljenosti iznosi 112,23 metar, a koeficijent varijacije 96,76 %.

Rezultati su, slično kao i kod udaljenosti isključivo od rasjeda, pokazali kako se najveći broj izvora (512, odnosno 56,89 %) nalazi u udaljenosti do 100 metara od lineamenata. S povećanjem udaljenosti od lineamenata broj izvora naglo pada te na udaljenostima većim od 700 metara nema izvora (Sl. 4.3.2.4; Tab. 4.3.2.2).

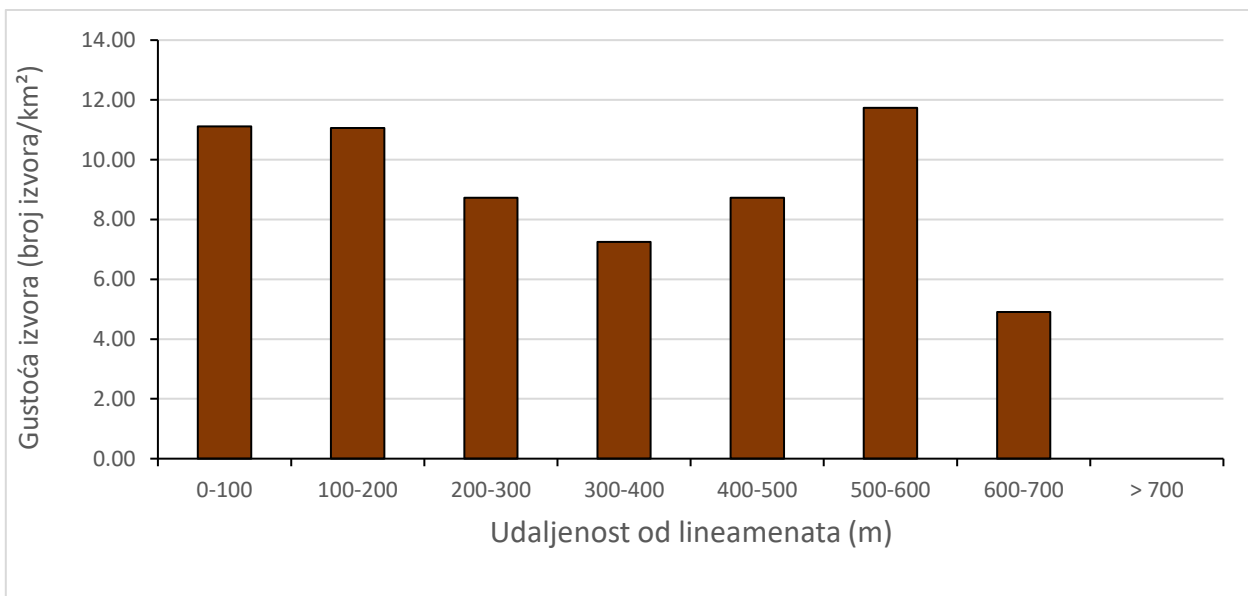
Usporedimo li gustoću izvora na prostorima kategorija udaljenosti od lineamenata vidljivo je kako je ona iznad prosjeka u prva dva razreda udaljenosti (0-100 m i 100-200 m) i iznosi 11,11 izvora/km², odnosno 11,07 izvora/km² (Tab. 4.3.2.2; Sl. 4.3.2.5). S daljnjim padom udaljenosti pada i gustoća izvora te se u razredima između 200 i 400 metara udaljenosti kreće od 8,73 do 7,25 izvora/km². U još udaljenijim razredima zabilježen je porast gustoće, te na udaljenosti od 500 do 600 metara od lineamenata doseže maksimalnu vrijednost od 11,74 izvora/km² (Tab. 4.3.2.2). U kategorijama s još većom udaljenosti gustoća naglo pada, do vrijednosti 0 na udaljenostima većim od 700 metara (Tab. 4.3.2.2).



Sl. 4.3.2.4 Udaljenost izvora od lineamenata

Tab. 4.3.2.2. Broj i gustoća izvora s obzirom na udaljenost od lineamenata

Udaljenost od lineamenata OGK (m)	Broj izvora	Udio izvora (%)	Površina (km ²)	Udio površine (%)	Gustoća izvora (izvori/km ²)
0-100	512	56,89	46,08	53,92	11,11
100-200	243	27,00	21,96	25,70	11,07
200-300	84	9,33	9,63	11,27	8,73
300-400	32	3,56	4,41	5,16	7,25
400-500	16	1,78	1,83	2,15	8,72
500-600	11	1,22	0,94	1,10	11,74
600-700	2	0,22	0,41	0,48	4,91
> 700	0	0,00	0,19	0,22	0,00
ukupno	900	100	85,45	100,00	10,53



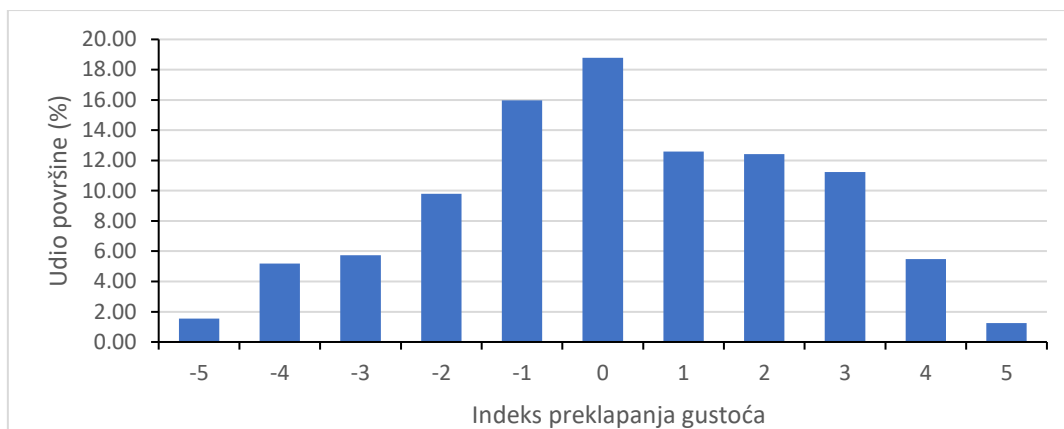
Sl. 4.3.2.5. Gustoća izvora prema udaljenosti od lineamenata

Kako bi se drugačijom metodom utvrdila povezanost izvora s rasjedima i kontaktima litostratigrafskih jedinica uspoređene su njihove gustoće unutar istraživanog područja. Za njihov izračun korištena je metoda gustoće jezgre (*kernel density*) u GIS programu. Veličina rasterskih ćelija izračunatih gustoća određena je na 50 x 50 metara, a radijus traženja je određen na 564 metra, kako bi se dobila površina od 1 km². Dobivene gustoće izvora, rastera i lineamenata podijeljene su u 6 kategorija, korištenjem

metode geometrijskih intervala (*geometric interval*) za određivanje granica klasa. Metoda geometrijskih intervala trebala bi biti najpouzdanija, budući da je nastala kao kompromis između metode prirodnih prekida, metode kvantila i metode jednakih intervala, kako bi se izbjegli njihovi nedostaci (*Data classification methods*, n.d.). Nakon klasifikacije na 6 razreda po svakoj metodi, izvršeno je vrednovanje na način da je razredima s najvećom gustoćom pridružena vrijednost 6, a s razredima s najmanjom gustoćom vrijednost 1. Isti postupak napravljen je za gustoću rasjeda i za gustoću lineamenata (rasjedi i kontakti litostratigrafskih jedinica) zasebno.

Idući korak učinjen je pomoću funkcije *Raster calculator*, gdje je od ćelija gustoće izvora oduzeta vrijednost preklapajućih ćelija gustoća rasjeda, a zasebno i gustoća lineamenata. Rezultat preklapanja je raster čije vrijednosti predstavljaju indeks preklapanja gustoće. Vrijednosti indeksa, odnosno ćelija rastera, mogu kretati se od -5 do +5. Vrijednost 0 u ovom slučaju predstavlja potpuno poklapanje gustoća izvora s gustoćom rasjeda, odnosno lineamenata. Negativne vrijednosti predstavljaju odstupanje gustoća, odnosno veću gustoću rasjeda ili lineamenata od gustoće izvora na području preklapanja. Pozitivne vrijednosti, nasuprot prethodnome, predstavljaju odstupanje gustoća na način da su gustoće izvora veće od gustoća rasjeda, odnosno lineamenata.

Rezultati dobiveni oduzimanjem vrijednosti gustoće rasjeda od gustoće izvora pokazali su kako 18,79 % istraživanog područja ima potpuno poklapanje gustoća izvora i rasjeda (Tab. 4.3.2.3; Sl. 4.3.2.6). Vrlo dobro poklapanje (vrijednosti -1 i 1) ima između 28,56 % istraživanog područja. Dobro poklapanje gustoća izvora i rasjeda (vrijednosti -2 i 2) ima 22,21 % područja, a umjereno poklapanje (vrijednosti -3 i 3), ima 16,97 % istraživanog područja (Tab. 4.3.2.3). Loše poklapanje gustoće izvora i rasjeda (vrijednosti -4 i 4) ima 10,67 % područja, a potpuno nepoklapanje (vrijednosti -5 i 5) samo od 2,81 % istraživanog područja (Tab. 4.3.2.3).

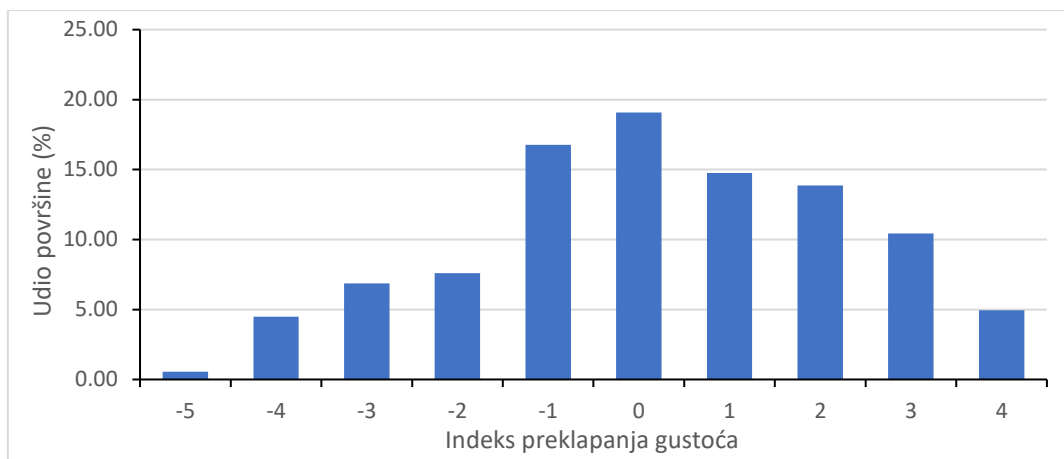


Sl. 4.3.2.6. Udio površina pojedinih vrijednosti indeksa preklapanja gustoća izvora s gustoćom rasjeda (vrijednost 0 označava potpuno poklapanje gustoća izvora i rasjeda)

Tab. 4.3.2.3. Udio površina vrijednosti indeksa gustoće dobivenih preklapanjem gustoća izvora i gustoća rasjeda

Vrijednost indeksa	Kategorija	Udio površine (%)
-5	Potpuno nepoklapanje (prostori najveće gustoće rasjeda, a najmanje gustoće izvora)	1,55
-4	Loše poklapanje	5,19
-3	Umjereno poklapanje	5,74
-2	Dobro poklapanje	9,79
-1	Vrlo dobro poklapanje	15,98
0	Potpuno poklapanje	18,79
1	Vrlo dobro poklapanje	12,58
2	Dobro poklapanje	12,42
3	Umjereno poklapanje	11,23
4	Loše poklapanje	5,48
5	Potpuno nepoklapanje (prostor najveće gustoće izvora, a najmanje gustoće rasjeda)	1,26

Rezultati dobiveni oduzimanjem vrijednosti gustoće lineamenata (rasjedi i kontakti litostratigrafskih jedinica zajedno) od gustoće izvora pokazali su kako 19,09 % istraživanog područja ima potpuno poklapanje gustoća izvora i lineamenata (Tab. 4.3.2.4; Sl. 4.3.2.7). Vrlo dobro poklapanje (vrijednosti -1 i 1) ima 31,52 % istraživanog područja. Dobro poklapanje gustoća izvora i lineamenata (vrijednosti -2 i 2) ima 21,46 % područja, a umjereno poklapanje (vrijednosti -3 i 3), ima 17,31 % istraživanog područja (Tab. 4.3.2.4). Loše poklapanje gustoće izvora i lineamenata (vrijednosti -4 i 4) ima 9,43 % područja, a potpuno nepoklapanje (vrijednosti -5 i 5) samo 1,19 % istraživanog područja (Tab. 4.3.2.4).



Sl. 4.3.2.7. Udio površina pojedinih vrijednosti indeksa preklapanja gustoća izvora s gustoćom lineamenata (vrijednost 0 označava potpuno poklapanje gustoća izvora i rasjeda)

Tab. 4.3.2.4. Udio površina vrijednosti indeksa gustoće dobivenih preklapanjem gustoća izvora i gustoća lineamenata (rasjedi i kontakti litostratigrafskih jedinica)

Vrijednost indeksa	Kategorija	Udio površine (%)
-5	Potpuno nepoklapanje (prostori najveće gustoće lineamenata, a najmanje gustoće izvora)	0,56
-4	Loše poklapanje	4,48
-3	Umjereno poklapanje	6,87
-2	Dobro poklapanje	7,60
-1	Vrlo dobro poklapanje	16,76
0	Potpuno poklapanje	19,09
1	Vrlo dobro poklapanje	14,76
2	Dobro poklapanje	13,87
3	Umjereno poklapanje	10,44
4	Loše poklapanje	4,95
5	Potpuno nepoklapanje (prostor najveće gustoće izvora a najmanje gustoće lineamenata)	0,63

4.3.3. Raspodjela kategorija izdašnosti u odnosu na geološka obilježja prostora

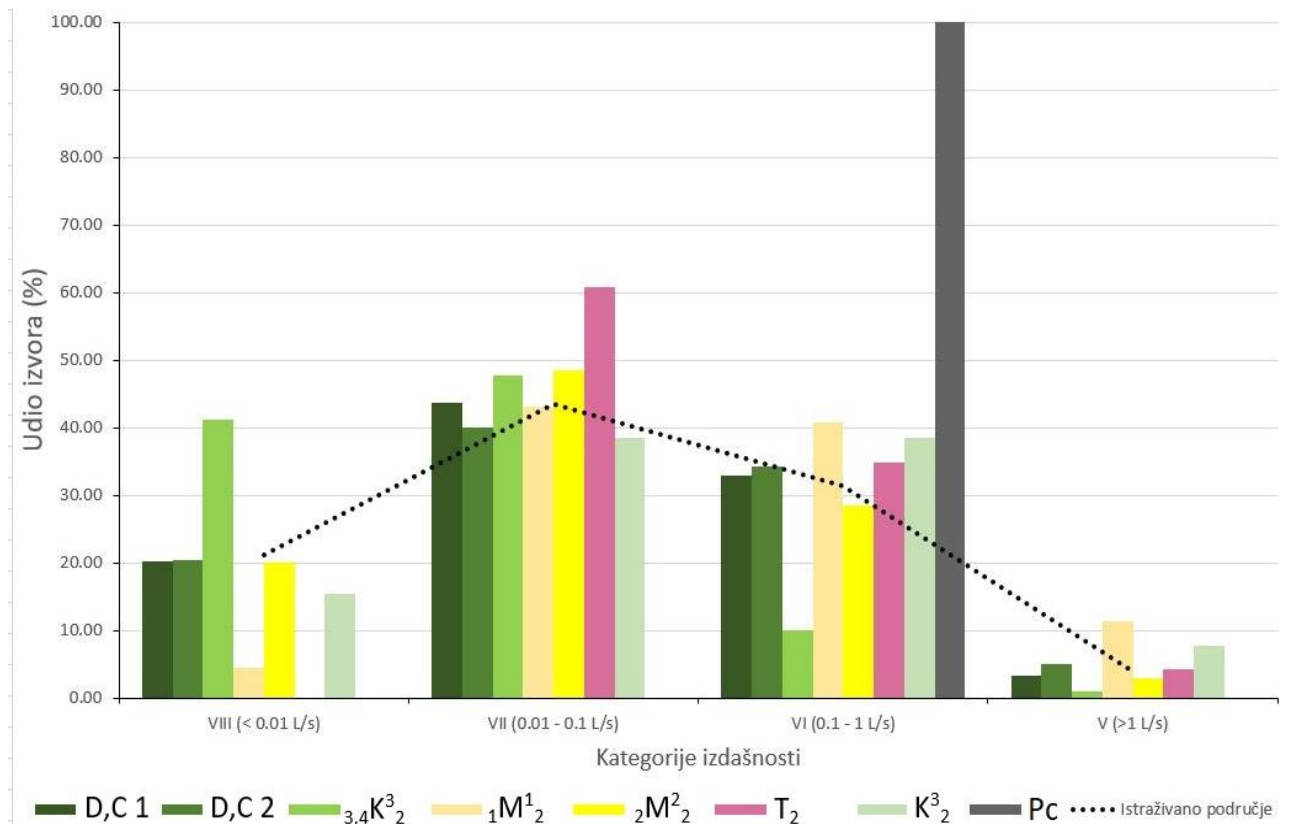
Pod pretpostavkom da postoje razlike u hidrološkim obilježjima izvora između različitih litostratigrafskih jedinica (zbog različitog potencijala za stvaranje vodonosnika) analizirani su udjeli klasa izdašnosti unutar različitih litostratigrafskih jedinica.

Rezultati su pokazali kako udjeli klasa izdašnosti na području litostratigrafskih jedinica ortometamorfita i parametamorfita (oznake D,C 1 i D,C 2; Sl. 5.4.1) te miocenskih (litotamnijskih) vapnenaca i lapora (oznaka ${}_2M^2_2$; Tab. 4.3.3.1; Sl. 4.3.3.1) prate prosječni udio klasa izdašnosti na cijelom istraživanom području. Udio izvora najmanje kategorije izdašnosti (VIII) na području ovih litostratigrafskih jedinica kreće se oko 20 %, izvora kategorija izdašnosti VII (0,01 – 0,1 L/s) od 40,15 % u slučaju parametamorfita do 48,57 % u slučaju litostratigrafske jedinice oznake ${}_2M^2_2$. Izvori kategorije VI (0,1 – 1 L/s) imaju udio od 28,57 % kod miocenskih vapnenaca (${}_2M^2_2$) do 34,31 % u slučaju ortometamorfita (D,C 1). Najizdašniji izvori imaju udio od 2,86 % na području miocenskih vapnenaca, 3,32 % na području parametamorfita te 5,11 % na području ortometamorfnihih stijena (Tab. 4.3.3.1; Sl. 4.3.3.1).

Konglomerati, breče i vapnenci gornjokredne starosti (oznaka ${}_{3,4}K^3_2$) pokazali su najveći udio izvora kategorije VIII (< 0,01 L/s), točnije 41,28 %. Izvori kategorije VII (0,01 – 0,1 l/s) čine 47,71 % izvora na području te litostratigrafske jedinice, dok izvori kategorije VI (0,1 – 1 L/s) čine 10,09 % izvora (Sl. 4.3.3.1). Najizdašniji izvori, kategorije V čine tek 0,92 % izvora ovog područja. Na području litostratigrafske jedinice slične starosti, oznake K^3_2 , zabilježeni su drugačiji udjeli. Ovdje izvori kategorije VIII čine 15,35 % istraživanog područja, a izvori kategorije VII i VI imaju identičan udio, 38,46 %. Najizdašniji izvori kategorije V čine 7,69 % svih izvora na ovoj litostratigrafskoj jedinici (Tab. 4.3.3.1; Sl. 4.3.3.1).

Na području miocenskih konglomerata, šljunaka i pijesaka (oznaka ${}_1M^1_2$) udio izvora kategorije VIII je tek 4,55 % (Tab. 4.3.3.1; Sl. 4.3.3.1). Izvori kategorije VII čine 43,18 % od ukupnog broja, a kategorije VI 40,91 %. Izvori kategorije V čine čak 11,36 % od ukupnog broja, što je najviše od svih promatranih litostratigrafskih jedinica. Najveći udio izvora, točnije 60,87 %, na području litostratigrafske jedinice srednjotrijaskih karbonata (pretežno dolomiti, oznaka T2) pripada klasi VII (0,01 – 0,1 L/s) (Sl. 5.4.1). Na području ove litostratigrafske jedinice nema izvora kategorije VIII, a izvori kategorija VI čine 34,78 % od svih izvora ovog područja. Najizdašniji izvori čine 4,35 % u ukupno broju izvora na području litostratigrafske jedinice srednjeg trijasa. Na prostorima paleogenskih

konglomerata i pješčenjaka (oznaka Pc) javljaju izvori isključivo klase izdašnosti VI (0,1 – 1 L/s; Tab. 4.3.3.1; Sl. 4.3.3.1). Litostratigrafske jedinice s manje od 7 izvora kojima je određena kategorija izdašnosti nisu uzeti u ovu analizu.



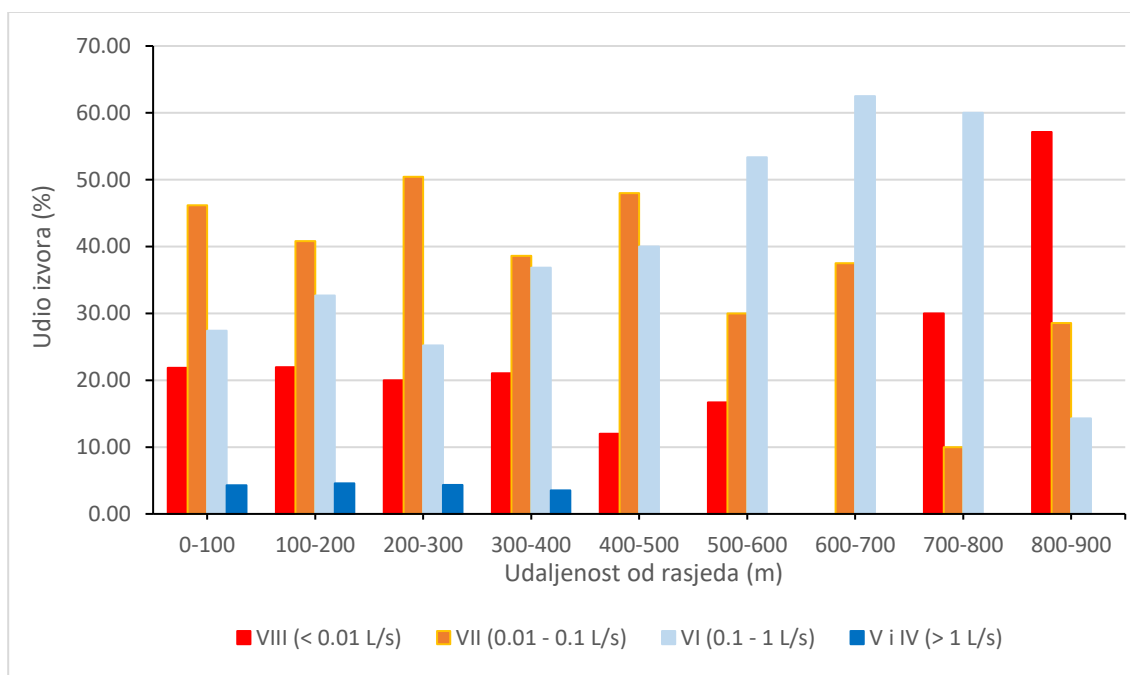
Sl. 4.3.3.1. Udio kategorija izdašnosti izvora prema litostratigrafskim jedinicama

Tab. 4.3.3.1. Broj i udio izvora prema kategorijama izdašnosti po litostratigrafskim jedinicama

		Broj izvora prema kategoriji izdašnosti				Udio izvora prema kategoriji izdašnosti			
Oznaka	Vrste stijena	VIII (< 0,01 L/s)	VII (0,01 - 0,1 L/s)	VI (0,1 - 1 L/s)	V i IV (> 1 L/s)	VIII (< 0,01 L/s)	VII (0,01 - 0,1 L/s)	VI (0,1 - 1 L/s)	V i IV (>1 L/s)
D, C 1	Parametamorfiti: grauvake, siltiti, vapnenci, dolomiti (devon, karbon)	79	171	129	13	20,15	43,62	32,91	3,32
D, C 2	Ortometamorfiti: škriljavci, gabri, dijabazi (devon, karbon)	28	55	47	7	20,44	40,15	34,31	5,11
3,4K ³ ₂	Breče, konglomerati, vapnenci (kreda)	45	52	11	1	41,28	47,71	10,09	0,92
1M ¹ ₂	Konglomerati, šljunci, pijesci (miocen)	2	19	18	5	4,55	43,18	40,91	11,36
2M ² ₂	Vapnenci, lapori, pješčenjaci (miocen)	7	17	10	1	20,00	48,57	28,57	2,86
T ₂	Dolomiti, podređeno vapnenci (trijas)	0	14	8	1	0,00	60,87	34,78	4,35
K ³ ₂	Konglomerati, vapnenci, lapori (kreda)	2	5	5	1	15,38	38,46	38,46	7,69
Pc	Konglomerati, pješčenjaci, lapori i vapnenci (paleogen)	0	0	7	0	0,00	0,00	100,00	0,00

Osim raspodjele po litostratigrafskim jedinicama, raspored izvora prema kategorijama izdašnosti uspoređen je s udaljenošću izvora od rasjeda. Izvori kategorije VIII (< 0,01 L/s) imaju udio oko 20 % udjela sve do razreda udaljenosti od 300 do 400 metara od rasjeda (Sl. 4.3.3.2). Nakon toga slijedi pad

u njihovom udjelu sve do razreda udaljenosti od 600 do 700 metara od rasjeda, gdje nema zabilježenih izvora te kategorije izdašnosti. Međutim, s daljnjim porastom udaljenosti njihov udio značajno raste sve do gotovo 58 % na udaljenosti od 800 do 900 metara od rasjeda. Izvori kategorije VII (0,01 – 0,1 L/s) variraju u udjelima od 38,6 % do 52 % do udaljenosti od 400 do 500 metara od rasjeda. Nakon toga udio skokovito pada do najnižih 10 % na udaljenosti od 700 do 800 metara od rasjeda, te ponovno raste do 28,57 % na najvećoj udaljenosti, od 800 do 900 metara od rasjeda. Linearni trend za udio izvora kategorije VII općenito je silazni. Nasuprot tome, trend udjela izvora kategorije izdašnosti VI (0,1 – 1 L/s) je uzlazni. Udio izvora relativno kontinuirano raste (uz iznimku na udaljenosti od 200 do 300 metara). Najveći udio zabilježen je na udaljenosti od 600 do 700 metara od rasjeda (62,5 %), nakon čega pada sve do minimalnog udjela od 14,29 % na najvećim udaljenostima od rasjeda (800 – 900 m). Izvori izdašnosti veće od 1 L/s (kategorije V i IV) imaju relativno stabilan udio između 3,51 % i 4,59 % sve do udaljenosti od 300 do 400 metara. Na većim udaljenostima od 400 metara nema zabilježenih izvora s izdašnošću većom od 1 L/s (Sl. 4.3.3.2).



Sl. 4.3.3.2. Udio kategorija izdašnosti izvora prema udaljenosti od rasjeda

4.4. Izvori i morfometrijska obilježja prostora

Morfometrijska obilježja analizirana su korištenjem digitalnog modela reljefa rezolucije 5 x 5 m. Svakom izvoru pridružena je informacija o morfometrijskoj veličini prostora na kojem se nalazi. Od morfometrijskih obilježja izvora analizirani su: nadmorska visina, nagib padina, vertikalna raščlanjenost reljefa, zakrivljenost padina, orijentacija padina i indeks topografske vlažnosti.

4.4.1. Nadmorska visina

Najviša točka istraživaniog područja je vrh Sljeme, visine 1033 metra nad morem. Najniža točka je na nadmorskoj visini od oko 170 metara. Prosječna nadmorska visina istraživaniog područja je 493 metra nad morem. Svakom istraživanom izvoru pridružena je njegova nadmorska visina. Prosječna vrijednost (aritmetička visina) nadmorske visine svih izvora je 528,28 metara, a medijan iznosi 491,45 metara nad morem. Najniži izvor smješten je na visini od 198 metara nad morem, a najviši na 923 metra. Standardna devijacija (standardno odstupanje) iznosi 168,98 metara, a koeficijent varijacije (omjer standardne devijacije i aritmetičke sredine) 31,99 %. Cijelo istraživano područje podijeljeno je na hipsometrijske razrede u intervalima od 100 metara nadmorske visine.

Najmanju površinu zauzimaju prostori s nadmorskom visinom manjom od 200 metara (0,01 km², odnosno 0,12 % istraživaniog područja). Na tim visinama pronađen je samo jedan izvor. Na visinama između 200 i 300 metara nad morem pronađeno je 45 izvora, odnosno njih 5 %. Prostori tih nadmorskih visina imaju površinu od 5,85 km², čime zauzimaju 6,85 % istraživaniog područja. Sukladno tome, srednja gustoća izvora na ovim nadmorskim visinama je 7,69 izvora/km² (Tab. 4.4.1.1; Sl. 4.4.1.1; Sl. 4.4.1.2; Sl. 4.4.1.3).

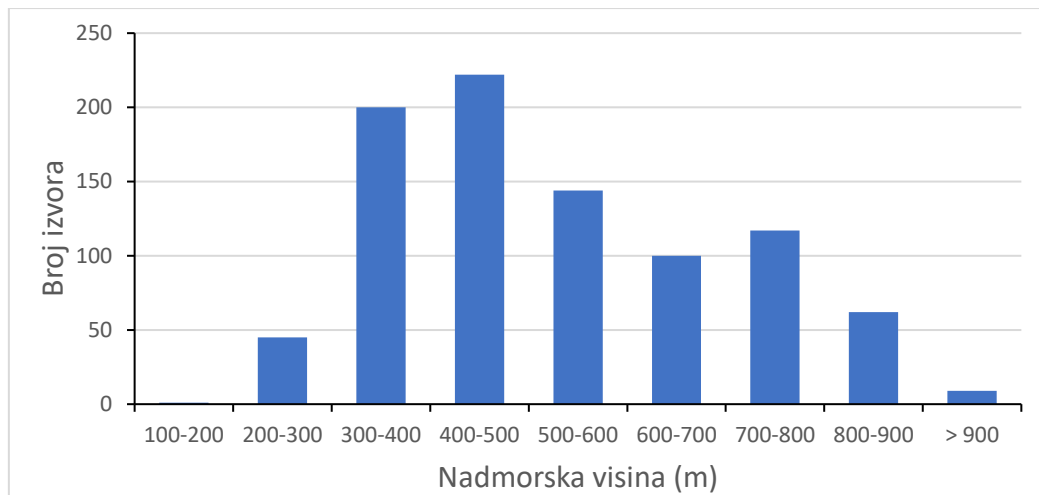
Na visinama između 300 i 400 metara kartirano je 200 izvora, odnosno njih 22,22 %. Time je ovaj hipsometrijski razred drugi po broju izvora. Istovremeno, prostori ovih nadmorskih visina zauzimaju najveću površinu, točnije 23,94 km², odnosno 28,02 % istraživaniog područja. Zbog toga je prosječna gustoća izvora na ovim visinama zapravo ispodprosječna i iznosi 8,35 izvora/km². Najveći broj izvora, njih 222, odnosno 24,67 %, nalazi se na visinama između 400 i 500 metara nad morem. Prostori u tom razredu nadmorskih visina zauzimaju 21,71 km², odnosno 25,4 % istraživaniog prostora. Zbog toga je prosječna gustoća izvora na ovim visinama malo ispod prosjeka cijelog istraživaniog područja, unatoč njihovoj brojnosti, te iznosi 10,23 izvora/km² (Tab. 4.4.1.1; Sl. 4.4.1.1; Sl. 4.4.1.2; Sl. 4.4.1.3).

Na prostorima s nadmorskom visinom između 500 i 600 metara istražena su 144 izvora, odnosno 16 % od ukupnog broja. Prostori ovih nadmorskih visina zauzimaju 13,02 km², odnosno 15,23 % istraživanog područja. Prosječna gustoća izvora na ovim visinama je 11,06 izvora/km², što je malo iznad prosječne gustoće cijelog istraživanog područja (10,53 izvora/km²). Na visinama između 600 i 700 metara nad morem pronađeno je 100 izvora, odnosno njih 11,11 %. Prostori ovih nadmorskih visina zauzimaju 8,91 km², odnosno 10,43 % istraživanog područja. Prosječna prostorna gustoća izvora je 11,22 izvora/km² (Tab. 4.4.1.1; Sl. 4.4.1.1; Sl. 4.4.1.2; Sl. 4.4.1.3).

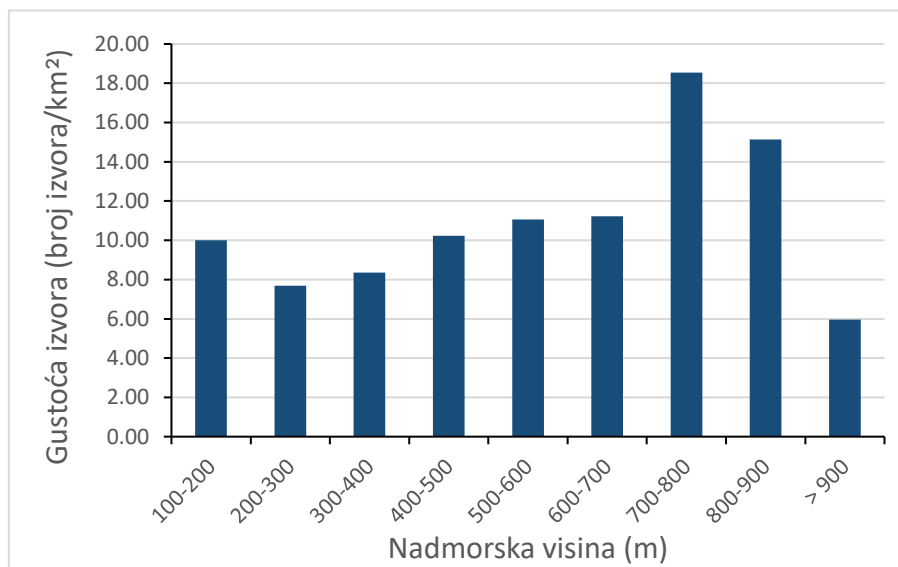
Na nadmorskim visinama između 700 i 800 metara pronađeno je 117 izvora, odnosno njih 13 %. Površina ovog visinskog razreda je 6,31 km², odnosno 7,38 % istraživanog područja. Zbog toga ovaj visinski razred ima najveću prosječnu gustoću izvora, točnije 18,54 izvora/km². Iznadprosječnu gustoću imaju i prostori na visinama između 800 i 900 metara nad morem, točnije 15,14 izvora/km². Na spomenutim visinama pronađeno je 6 izvora, odnosno njih 6,89 % od ukupnog broja. Površina istraživanog prostora s nadmorskim visinama između 800 i 900 metara je 4,1 km², odnosno 4,79 % površine cijelog istraživanog područja. Na visinama iznad 900 metara pronađeno je 9 izvora, odnosno njih 1 %. Na visinama iznad 900 metara nalazi se 1,77 % istraživanog područja, odnosno 1,51 km². Prosječna gustoća stoga iznosi ispodprosječnih 5,96 izvora/km² (Tab. 4.4.1.1; Sl. 4.4.1.1; Sl. 4.4.1.2; Sl. 4.4.1.3).

Tab. 4.4.1.1. Broj izvora i gustoća izvora prema nadmorskim visinama

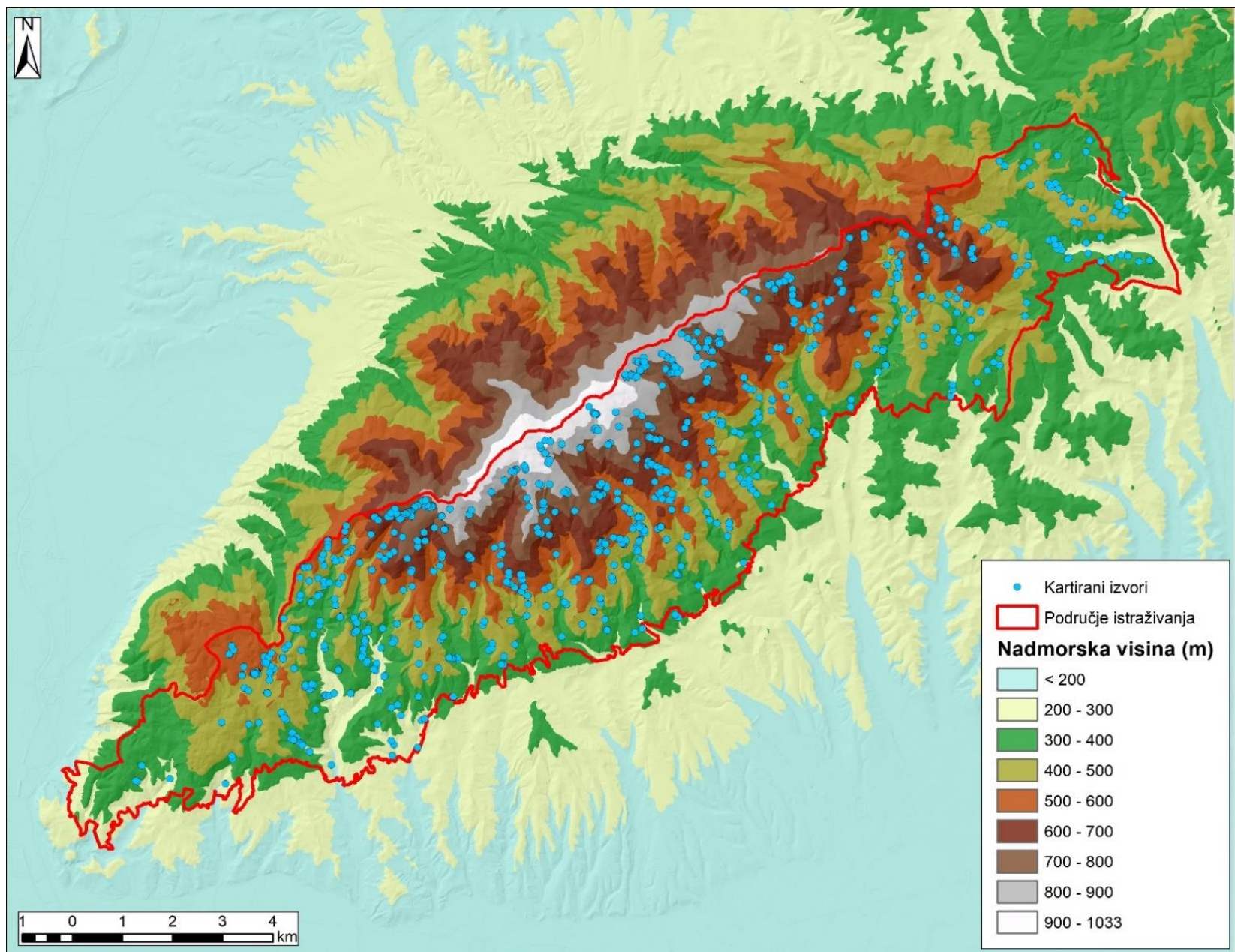
Nadmorska visina (m)	Broj izvora	Udio izvora (%)	Površina (km ²)	Udio površine (%)	Gustoća izvora (izvori/km ²)
100-200	1	0,11	0,10	0,12	10,01
200-300	45	5,00	5,85	6,85	7,69
300-400	200	22,22	23,94	28,02	8,5
400-500	222	24,67	21,71	25,40	10,23
500-600	144	16,00	13,02	15,23	11,06
600-700	100	11,11	8,91	10,43	11,22
700-800	117	13,00	6,31	7,38	18,54
800-900	62	6,89	4,10	4,79	15,14
> 900	9	1,00	1,51	1,77	5,96
Ukupno	900	100	85,45	100,00	10,53



Sl. 4.4.1.1. Broj izvora prema nadmorskim visinama



Sl. 4.4.1.2. Gustoća izvora prema nadmorskim visinama



Sl. 4.4.1.3. Prostorni raspored izvora prema nadmorskim visinam

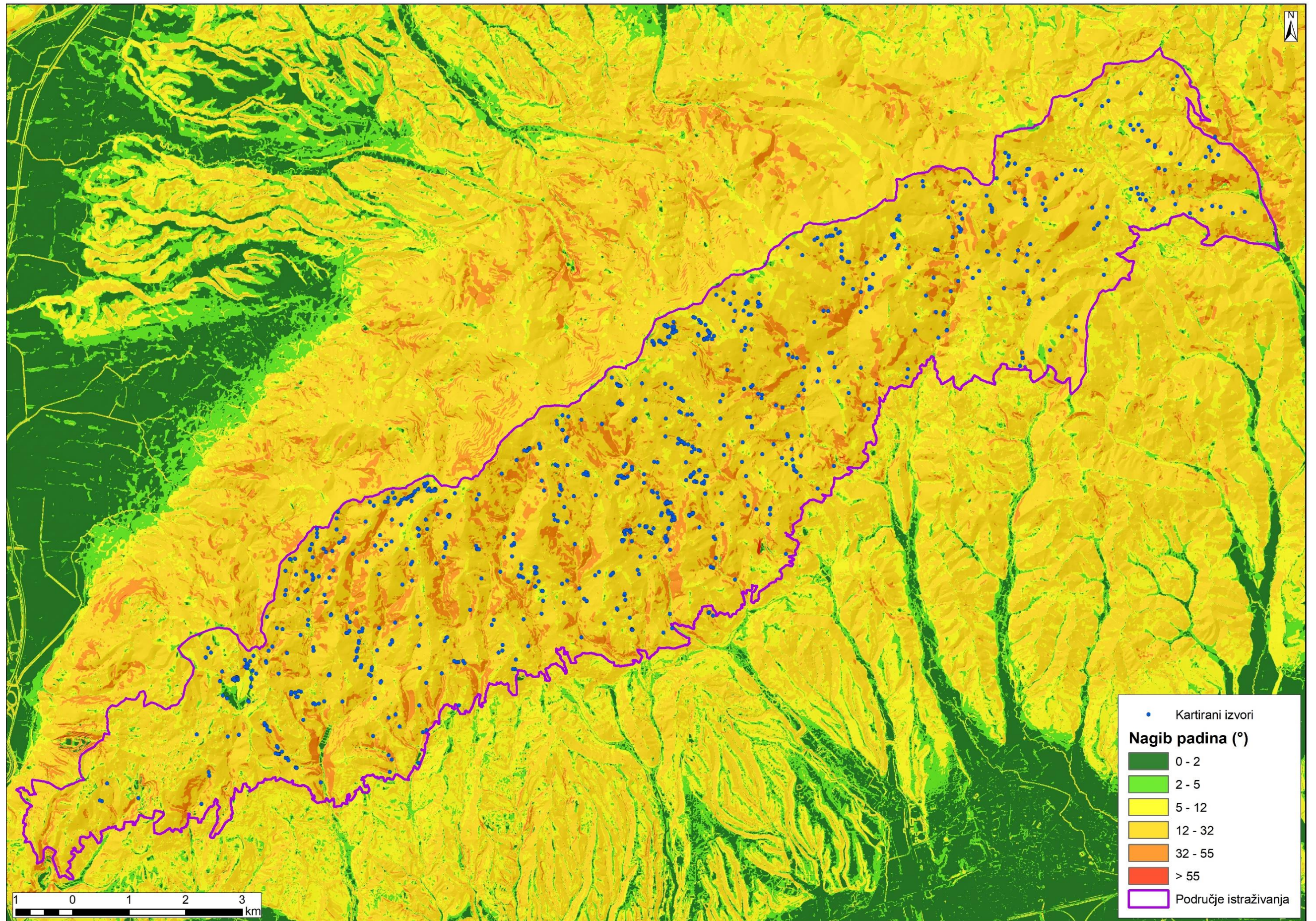
4.4.2. Nagib padina

Kartirani izvori analizirani su s obzirom na nagib padina na kojima se nalaze korištenjem digitalnog modela reljefa i alata *Slope* u GIS okruženju. Svakom izvoru pridružena je vrijednost nagiba padine na kojoj se nalazi, izražena u stupnjevima (°). Prosječni nagib padina prostora istraživanja je 21,38°, a ukupan raspon nagiba padina je od 0° do 75°. Prosječni nagib padina svih izvora iznosi 22,31°, dok je medijalna vrijednost 22,28°. Najveći izmjereni nagib padine na kojoj se nalazi izvor je 44,85°, a najmanji 0,64°. Standardna devijacija nagiba padina na kojima se nalaze izvori iznosi 6,98°, a koeficijent varijacije 31,27 %.

Područje istraživanja podijeljeno je prema razredima nagiba padina na 6 klasa, koristeći standardnu geomorfološku podjelu (Demek, 1972; Lozić, 1996). Gotovo ravna područja, s nagibom padina manjim od 2° zauzimaju 0,34 km², odnosno 0,39 % površine istraživanog područja. Na tim prostorima pronađena su tek 2 izvora. Na blago nagnutim padinama, nagiba od 2° do 5° pronađen je tek 1 izvor. Blago nagnute padine zauzimaju 1,4 km², odnosno 1,64 % površine istraživanog prostora (Tab. 4.4.2.1; Sl. 4.4.2.1; Sl. 4.4.2.2).

Nagnuti tereni (nagib padina 5 – 12°), zauzimaju površinu od 10,49 km², odnosno 12,28 % istraživanog područja. Na njima se nalaze 63 izvora (7 % od ukupnog broja), sukladno čemu je gustoća izvora na nagnutim terenima ispod prosjeka (10,53 izvora/km²) i iznosi 6,01 izvor/km². Jako nagnuti tereni (nagib od 12 – 32°) zauzimaju veliku većinu područja istraživanja, točnije 74,37 % (63,55 km²). Sukladno tome na njima je pronađeno i najviše izvora, njih 760, odnosno 84,44 % od ukupnog broja. Na jako nagnutim padinama izmjerena je i najveća gustoća izvora, 11,96 izvora/km² (Tab. 4.4.2.1; Sl. 4.4.2.1; Sl. 4.4.2.2; Sl. 4.4.2.3).

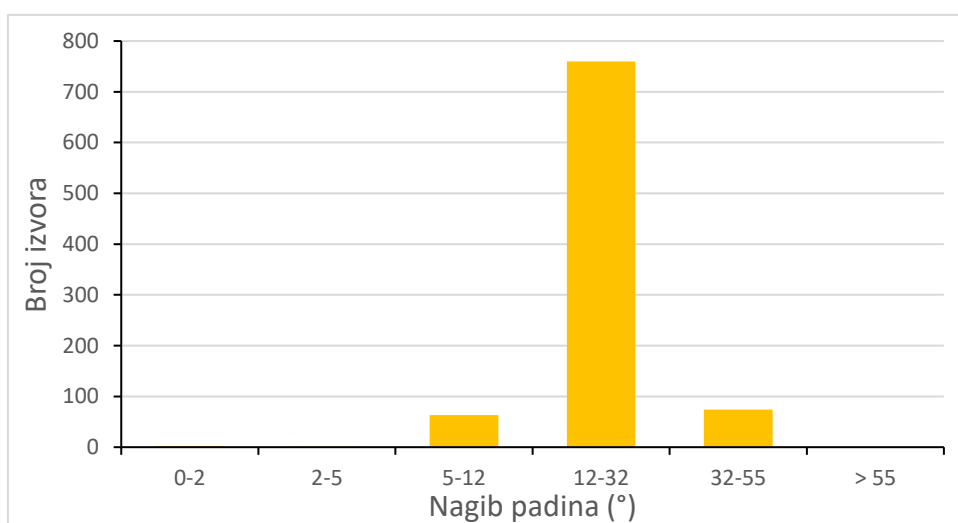
Na vrlo strmim terenima (nagib padina od 32 – 55°) kartirana su 74 izvora (8,22 % od ukupnog broja). Vrlo strmi tereni čine 11,26 % istraživanog područja, odnosno 9,62 km². Sukladno tome gustoća izvora iznosi 7,69 izvora/km² (Tab. 4.4.2.1; Sl. 4.4.2.3). Na strmcima (padine s nagibom većim od 55°) nije pronađen niti jedan izvor. Prema analizu oni zauzimaju samo 0,05 % istraživanog područja, odnosno 0,04 km² (Tab. 4.4.2.1; Sl. 4.4.2.2). Treba napomenuti kako su pojedini izvori pronađeni i na strmcima, međutim ti strmci nisu bili dovoljno veliki da bi bili izraženi u korištenom digitalnom modelu reljefa rezolucije 5 x 5 m (Sl. 4.4.2.4).



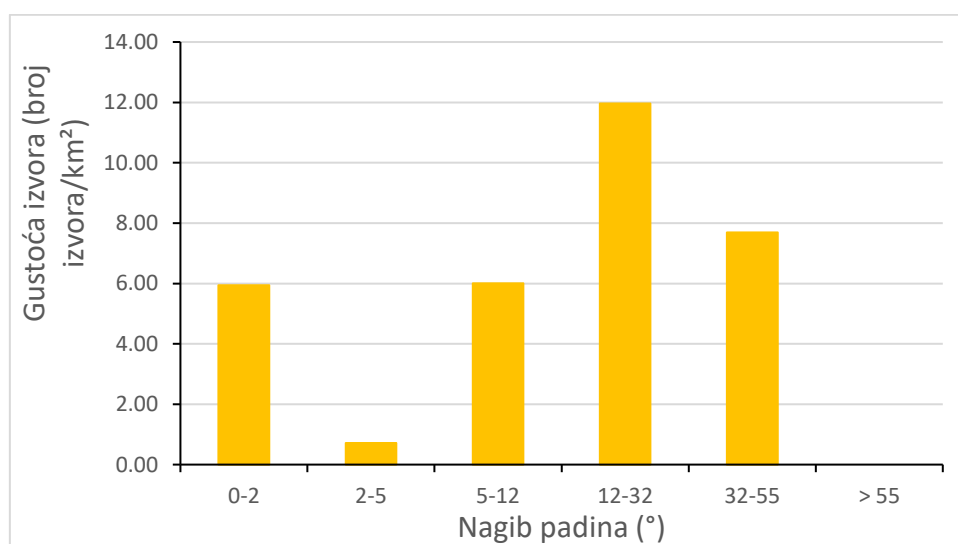
Sl. 4.4.2.1. Karta nagiba padina i kartirani izvori

Tab. 4.4.2.1. Broj izvora i gustoća izvora prema nagibima padina

Nagib padina (°)	Broj izvora	Udio izvora (%)	Površina (km ²)	Udio površine (%)	Gustoća izvora (izvori/km ²)
0-2	2	0,22	0,34	0,39	5,94
2-5	1	0,11	1,40	1,64	0,71
5-12	63	7,00	10,49	12,28	6,01
12-32	760	84,44	63,55	74,37	11,96
32-55	74	8,22	9,62	11,26	7,69
> 55	0	0,00	0,04	0,05	0,00
ukupno	900	100,00	85,45	100,00	10,53

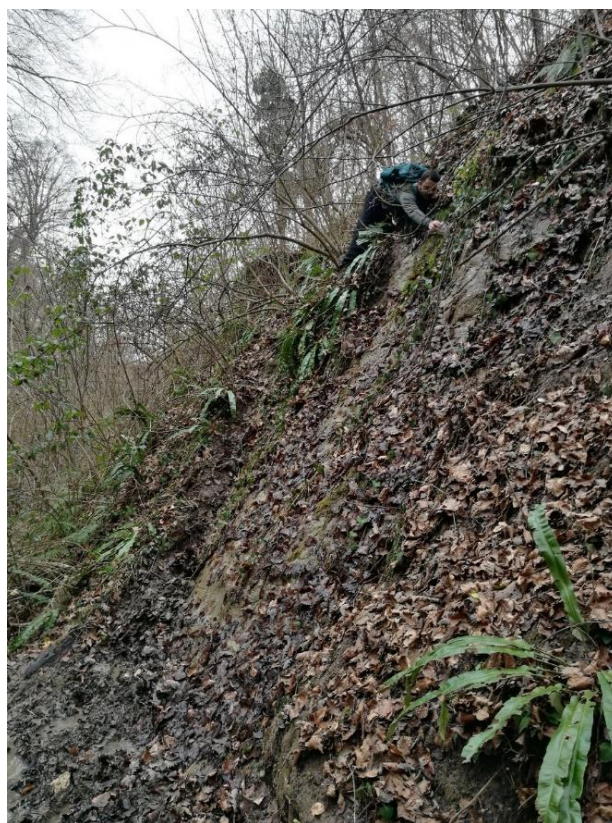


Sl. 4.4.2.2. Broj izvora prema kategorijama nagiba padina

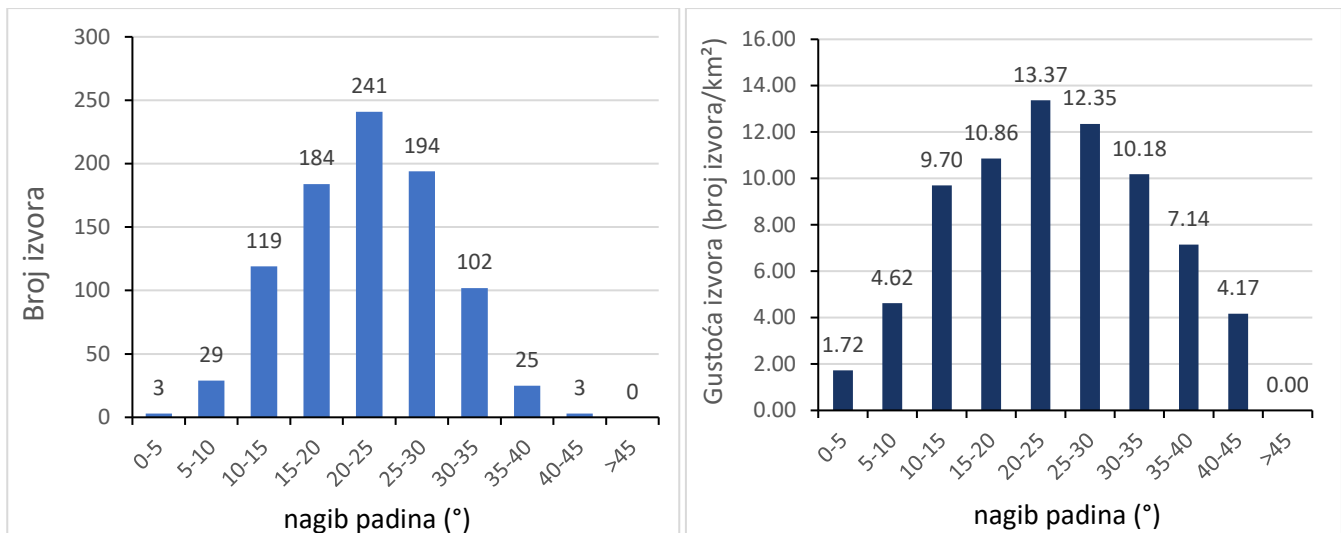


Sl. 4.4.2.3. Gustoća izvora prema nagibu padina

U svrhu detaljnije analize, budući da je razred nagiba padina s najvećim brojem i gustoćom izvora dosta širokog raspona, nagibi padina podijeljeni su u kategorije s rasponom od 5°. Na taj način pokušala se dobiti detaljnija slika o nagibima padina na kojima se izvori češće pojavljuju. Rezultati (Sl. 4.4.2.5) su pokazali kako se izvori najčešće pojavljuju na padinama nagiba između 20° i 25° (241 izvor, 26,78 %), a isti razred ima i najveću gustoću izvora (13,37 izvora/km²). Drugi najveći broj i gustoću izvora imaju padine s nagibima između 25° i 30° (194 izvora; 12,35 izvora/km²). Treći razred nagiba padina po broju i gustoći izvora jest onaj između 15° i 20° (184 izvora, 10,86 izvora/km²; Sl. 4.4.2.5).



Sl. 4.4.2.4. Izvor na vrlo strmoj padini uz potok Družinec (pritok Vrapčaka)



Sl. 4.4.2.5. Broj (lijevo) i gustoća izvora (desno) prema kategorijama nagiba padina raspona 5°

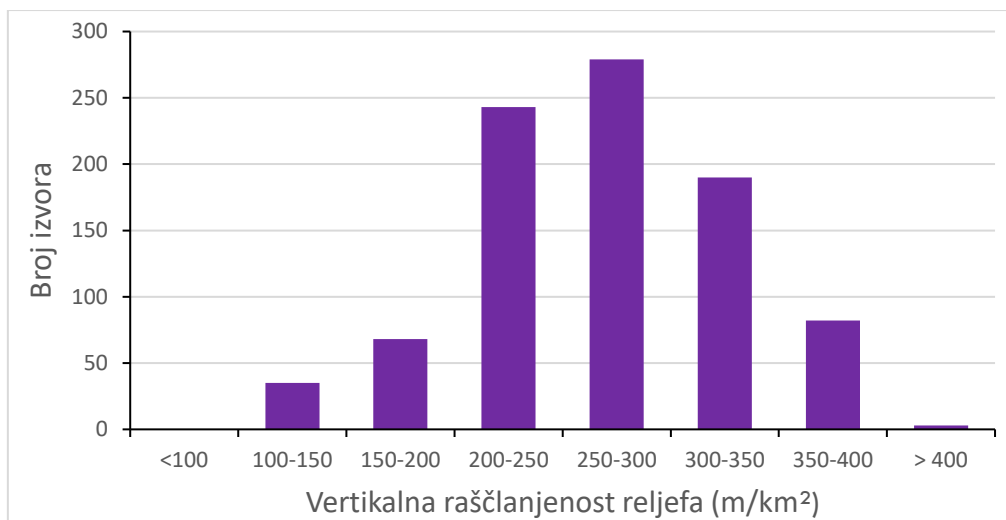
4.4.3. Vertikalna raščlanjenost reljefa

Prostorni raspored izvora analiziran je s obzirom na vertikalnu raščlanjenost reljefa na prostoru na kojem se nalaze. Korištenjem digitalnog modela reljefa izračunata je vertikalna raščlanjenost reljefa za cijelo područje istraživanja. Vertikalna raščlanjenost definira se kao razlika u nadmorskoj visini između najviše i najniže točke na jedinici prostora i izražava se u metrima po kilometru kvadratnom (Lozić, 1995). Vertikalna raščlanjenost pokazatelj je energije reljefa, te se njome mogu izdvojiti prostori pojašane denudacije i prostori pojačane akumulacije materijala (Marković, 1983; Pahernik, 2005). Na taj način pokušalo se utvrditi postoji li ovisnost pojavljivanja izvora o iznosu vertikalne raščlanjenosti, a time i intenzitetu trošenja i akumulacije materijala. Za svaku ćeliju digitalnog modela reljefa izračunata je vertikalna raščlanjenost u radijusu od 564 metra, odnosno u krugu veličine 1 km². Svakom izvoru pridružena je vrijednost vertikalne raščlanjenosti prostora na kojem se nalaze. Srednja vrijednost vertikalne raščlanjenosti cijelog istraživanog porostora je 255 m/km², a ukupan raspon vrijednosti kreće se od 83 m/km² do 433 m/km². Prosječna vrijednost vertikalne raščlanjenosti terena na kojima su zabilježeni izvori je 268 m/km², dok medijalna vrijednost iznosi 263 m/km². Najveća vrijednost vertikalne raščlanjenosti mjesta u kojem se nalazi izvor je 424 m/km², a najmanja 103 m/km². Standardna devijacija iznosi 58,96 m/km², a koeficijent varijacije 21,99 %.

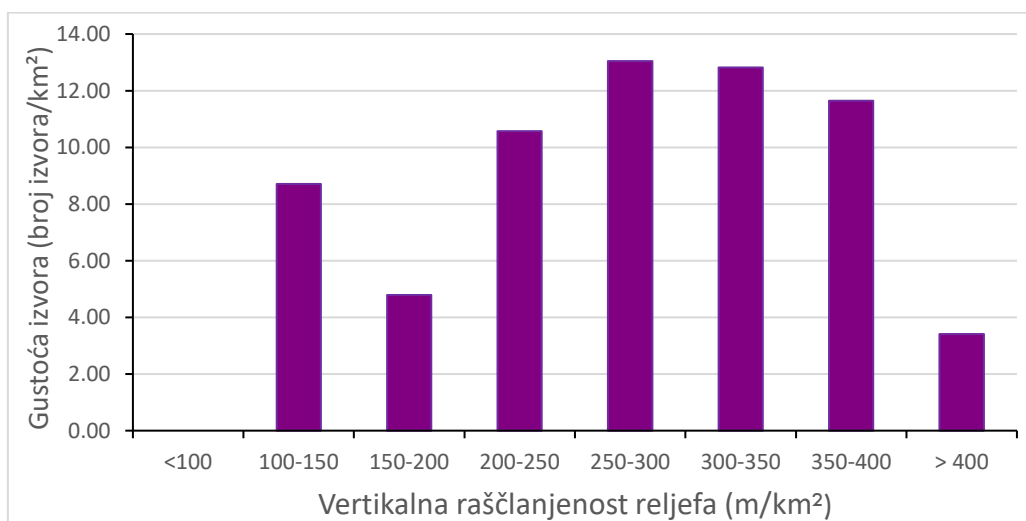
Područja s vertikalnom raščlanjenošću manjom od 100 m/km² zauzimaju svega 0,08 km² (0,09 % istraživanog područja). Na tom malom prostoru nije pronađen niti jedan izvor. Prostori s vertikalnom raščlanjenosti reljefa između 100 i 150 m/km² zauzimaju nešto više od 4,02 km², odnosno 4,7 % istraživanog područja (Tab. 4.4.3.1). Na prostorima s tim vrijednostima vertikalne raščlanjenosti nalazi se 35 izvora (3,89 % od ukupnog broja), čime gustoća izvora iznosi 8,71 izvor/km² (Sl. 4.4.3.1; Sl. 4.4.3.2). Na područjima s vertikalnom raščlanjenosti reljefa između 150 i 200 m/km² kartirano je 68 izvora (7,56 %). Budući da ta područja zauzimaju 14,21 km² (16,63 % istraživanog područja), gustoća izvora iznosi 4,78 izvora po km².

Na područjima s vertikalnom raščlanjenosti reljefa između 200 i 250 m/km² pronađena su 243 izvora, odnosno njih 27 %, što čini ovaj razred drugim po veličini gledajući broj izvora. Područja ove vertikalne raščlanjenosti zauzimaju 23 km², odnosno 26,91 % istraživanog područja. Sukladno tome, gustoća izvora iznosi 10,57 izvora/km², što je gotovo identično prosječnoj gustoći izvora na istraživanom području (10,53 izvora/km²). Na prostorima s vertikalnom raščlanjenosti reljefa između 250 i 300 m/km² nalazi se najviše izvora, njih 279 (31 %). Područja ovih vrijednosti vertikalne raščlanjenosti reljefa zauzimaju 25,03 % istraživanog područja (21,39 km²), sukladno čemu imaju najveću gustoću izvora, točnije 13,05 izvora/km² (Tab. 4.4.3.1; Sl. 4.4.3.1; Sl. 4.4.3.2; Sl. 4.4.3.3).

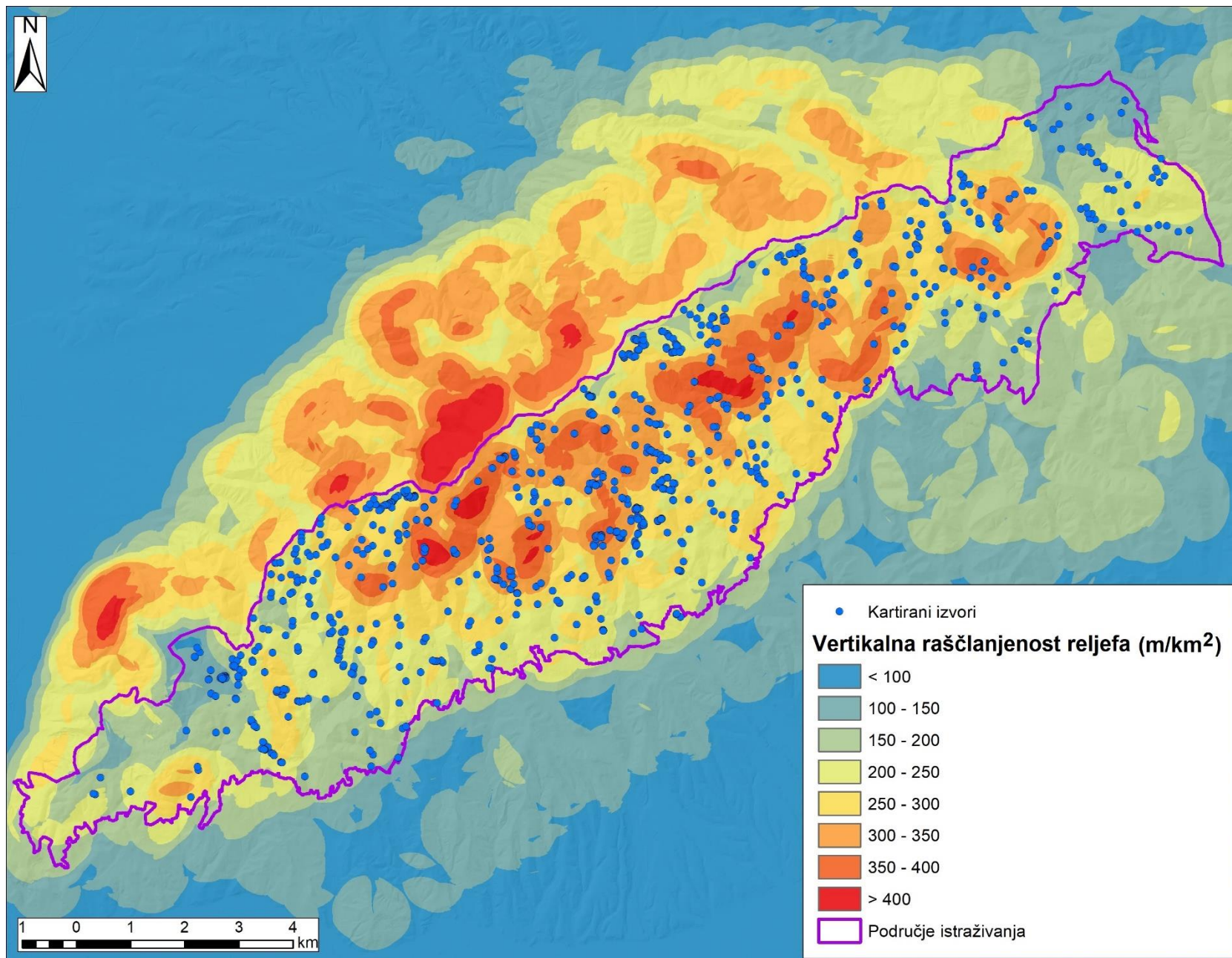
Drugu najveću gustoću izvora (12,81 izvor/km²) imaju i prostori s vertikalnom raščlanjenosti reljefa između 300 i 350 m/km². Na njima se nalazi 190 kartiranih izvora (21,11 %), a zauzimaju površinu od 14,83 km². Nadprosječnu gustoću izvora (11,64 izvora/km²) imaju i dijelovi istraživanog područja s vertikalnom raščlanjenosti između 350 i 400 m/km². Ondje su pronađena 82 izvora (9,11 %), na površini od 7,04 km² (8,24 %; Tab. 4.4.3.1; Sl. 4.4.3.1; Sl. 4.4.3.2; Sl. 4.4.3.3).



Sl. 4.4.3.1. Broj izvora prema vertikalnoj raščlanjenosti reljefa



Sl. 4.4.3.2. Gustoća izvora prema vertikalnoj raščlanjenosti reljefa



Sl. 4.4.3.3. Raspored izvora s obzirom na vertikalnu raščlanjenost reliefa

Tab. 4.4.3.1. Broj izvora i gustoća izvora prema vertikalnoj raščlanjenosti reljefa

Vertikalna raščlanjenost (m/km ²)	Broj izvora	Udio izvora (%)	Površina (km ²)	Udio površine (%)	Gustoća izvora (izvori/km ²)
< 100	0	0,00	0,08	0,09	0,00
100-150	35	3,89	4,02	4,70	8,71
150-200	68	7,56	14,21	16,63	4,78
200-250	243	27,00	23,00	26,92	10,57
250-300	279	31,00	21,39	25,03	13,05
300-350	190	21,11	14,83	17,36	12,81
350-400	82	9,11	7,04	8,24	11,64
> 400	3	0,33	0,88	1,03	3,42
ukupno	900	100	85,45	100,00	10,53

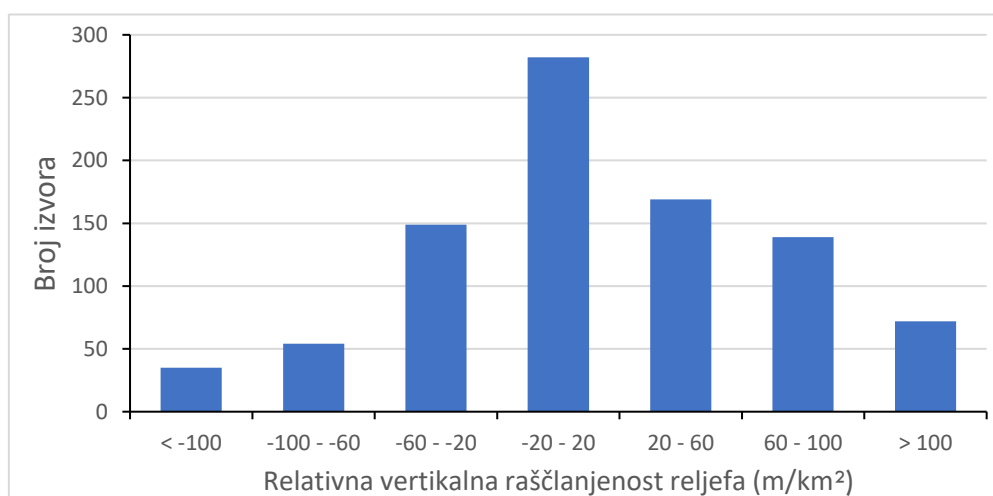
U svrhu određivanja prostora pojačane denudacije i tektonskog izdizanja te prostora akumulacije materijala, od izračunatih vrijednosti vertikalne raščlanjenosti reljefa svake ćelije rastera oduzeta je srednja vrijednost vertikalne raščlanjenosti cijelog istraživanog područja (Marković, 1983; Pahernik, 2005). Rezultat je novi raster s relativnom vertikalnom raščlanjenosti, čije ćelije mogu imati pozitivne i negativne vrijednosti. Pozitivne vrijednosti predstavljaju zone pojačane denudacije, dok negativne vrijednosti predstavljaju zone gdje je izražena veća akumulacija materijala.

Najveće područje zauzimaju prostori s relativnom vertikalnom raščlanjenošću između -20 i 20 m/km². Njihova površina je 18,89 km², odnosno 22,1 % istraživanog područja (Tab. 4.4.3.2). Na istim prostorima nalazi se i najveći broj izvora, njih 282 (31,33 %) te ujedno imaju i najveću gustoću izvora, 14,93 izvora/km² (Sl. 4.4.3.4; Sl. 4.4.3.5). U razredima isključivo negativnih vrijednosti relativne vertikalne raščlanjenosti (prostori pojačane akumulacije materijala) najveću površinu čine prostori s vrijednostima od -60 do -20 m/km², 18,07 km² (21,15 %). Na tim prostorima nalazi se 149 izvora (16,56 %), a gustoća iznosi 8,24 izvora/km², što je ispod prosjeka cijelog prostora (10,53 izvora/km²). Prostori s relativnom vertikalnom raščlanjenosti vrijednosti između -100 i -60 čine 13,44 % istraživanog područja (11,49 km²). Na tim prostorima nalaze se 54 izvora (6 %), a gustoća je 4,7 izvora/km², što je najniža vrijednost od svih razreda. Na prostorima najnižih vrednosti relativne vertikalne raščlanjenosti (< -100 m/km²) nalazi se najmanji broj izvora, njih 35. Površina prostora je 4,94 km², (5,89 % istraživanog područja), sukladno čemu gustoća iznosi 7,08 izvora/km² (Tab. 4.4.3.2).

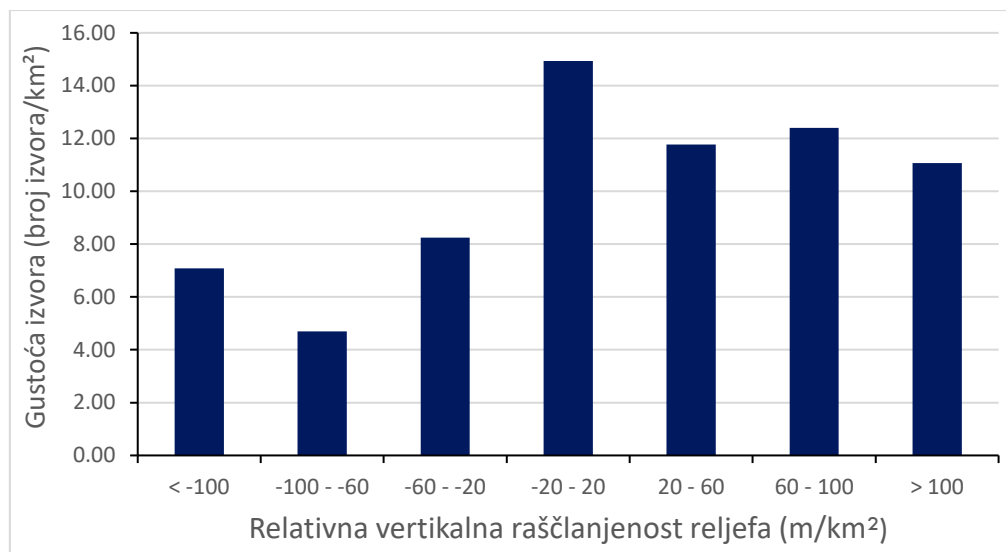
Kod razreda s isključivo pozitivnom relativnom vertikalnom raščlanjenosti (područja pojačane denudacije) najveći broj izvora nalazi se na područjima od 20 do 60 m/km², njih 169 (18,78 %). Površina koju zauzimaju te vrijednosti iznosi 14,35 km² (16,8 %), čime je gustoća izvora 11,78 izvora/km². Na područjima s relativnom vertikalnom raščlanjenosti između 60 i 100 m/km² nalazi se 139 izvora (15,44 %). Ti prostori zauzimaju površinu od 11,2 km² (13,11 %), a gustoća izvora je 12,41 izvora/km², što je druga najveća gustoća od svih razreda (Sl. 4.4.3.4; Sl. 4.4.3.5). Na prostorima najviših vrijednosti relativne vertikalne raščlanjenosti (> 100 m/km²) nalaze se 72 izvora (8 %), na površini od 6,5 km² (7,61 %). Gustoća izvora i ovdje je iznad prosjeka cijelog istraživanog prostora i iznosi 11,07 m/km² (Tab. 4.4.3.2).

Tab. 4.4.3.2. Broj izvora i gustoća izvora prema relativnoj vertikalnoj raščlanjenosti reljefa

relativna vertikalna raščlanjenost reljefa (m/km ²)	Broj izvora	Udio izvora (%)	Površina (km ²)	Udio površine (%)	Gustoća izvora (izvori/km ²)
< -100	35	3,89	4,94	5,78	7,08
-100 - -60	54	6,00	11,49	13,44	4,70
-60 - -20	149	16,56	18,07	21,15	8,24
-20 - 20	282	31,33	18,89	22,10	14,93
20 - 60	169	18,78	14,35	16,80	11,78
60 - 100	139	15,44	11,20	13,11	12,41
> 100	72	8,00	6,50	7,61	11,07
ukupno	900	100	85,45	100,00	10,53



Sl. 4.4.3.4. Broj izvora prema relativnoj vertikalnoj raščlanjenosti reljefa



Sl. 4.4.3.5. Gustoća izvora prema relativnoj vertikalnoj raščlanjenosti reljefa

4.4.4. Ekspozicija (orijentacija) padina

Prostorni raspored izvora analiziran je s obzirom na ekspoziciju padina na kojima se nalaze. Prostor istraživanja u GIS okruženju podijeljen je u 8 razreda s obzirom na orijentaciju, odnosno nagnutost prema pojedinoj strani svijeta. Pri tome se kut određuje najčešće od pravca sjevera u smjeru kazaljke na satu (Pahernik, 2007). Ekspozicija, odnosno azimut padina, izračunati su korištenjem alata *aspect* u programu ArcMap 10.7. Svakom izvoru pridodana je kutna vrijednost ekspozicije padine na kojoj se nalazi te su potom svrstani u jedan od 8 razreda. Ekspozicija ima utjecaj na intenzitet recentnih geomorfoloških procesa, a očituje se poglavito u utjecaju Sunčeva zračenja na amplitude temperature zraka, tla, pa i vode, potom mehaničko trošenje stijenske mase, dužinu vegetacijskog perioda te nejednaku izloženost padina smjeru kišonosnih vjetrova (Pahernik, 2007; Lozić i dr, 2012).

Udio različitih orijentacija padina uvjetovan je prvenstveno oblikom i pružanjem istraživanog područja, ali i definiranjem njegovih granica, budući da se radi o prisojnoj strani Medvednice. Osim navedenog, važna je i reljefna struktura prostora. Pružanje grebena Medvednice je u smjeru jugozapad-sjeveroistok, zbog čega je cijelo istraživano područje u prosjeku *nagnuto* prema jugoistoku. Pružanje potočnih dolina i kosa određuje udio ostalih orijentacija padina.

Sjeverno orijentirane padine (oznaka N) zauzimaju nešto manje od 5 % istraživanog područja (4,25 km²; Tab. 4.4.4.1; Sl. 4.4.4.1). Na njima je pronađen 21 izvor, odnosno njih 2,33 %. Sjeveroistočne padine zauzimaju 11,73 % istraživanog područja, odnosno nešto više od 10 km². Na njima se nalazi

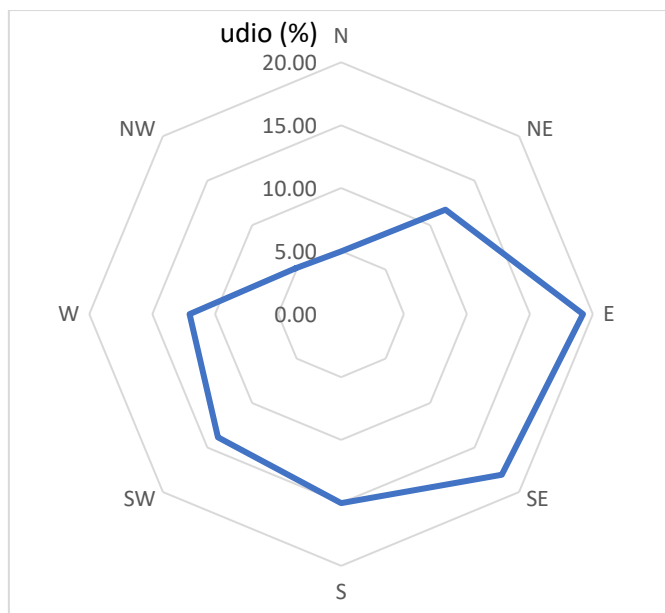
129 izvora, odnosno njih 14,33 %. Istočne padine imaju najveći broj izvora, njih 203, ali zauzimaju i najveći dio istraživanog područja, 19,22 %, odnosno 16,42 km² (Tab. 4.4.4.1; Sl. 4.4.4.2; Sl. 4.4.4.3). Jugoistočne padine zauzimaju 18,06 % istraživanog područja (15,43 km²) te se na njima nalazi 185 izvora (20,56 %). Na južnim padinama pronađeno je 146 izvora (16,22 %), a one zauzimaju površinu od 12,83 km², odnosno 15,02 % istraživanog područja. Jugozapadne padine čine 13,83 % istraživanog područja, a na njima se nalazi 139 izvora (Tab. 4.4.4.1; Sl. 4.4.4.2; Sl. 4.4.4.3).

Zapadno orijentirane padine zauzimaju 10,28 km² (12,04 %) te je na njima pronađeno 58 izvora (Sl. 4.4.4.1). Najmanje izvora, njih 19 (2,11 %), pronađeno je na sjeverozapadnim padinama. Njihov udio u istraživanom području također je malen, zauzimaju 5,14 % istraživanog područja (4,39 km²).

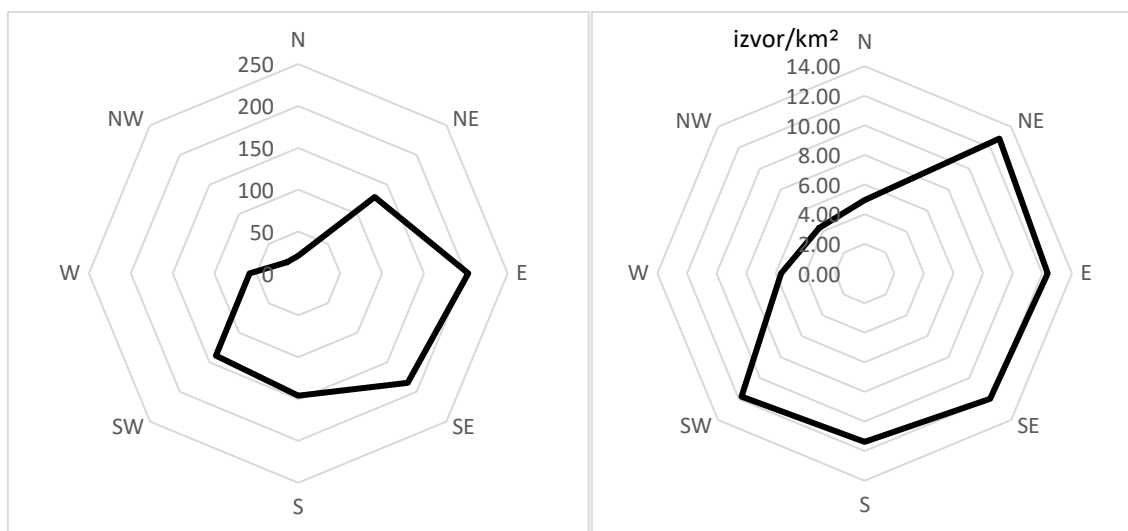
Brojem izvora ističu se istočne i jugoistočne padine, dok ih je najmanje na sjeverozapadnim i sjevernim padinama. Uspoređujući broj izvora s površinom različito orijentiranih padina, vidljivo je kako je gustoća izvora najveća na sjeveroistočnim i istočnim padinama (12,87 i 12,36 izvora/km²). Iznadprosječnu gustoću imaju i jugoistočne (11,99 izvora/km²), južne (11,38 izvora/km²) i jugozapadne (11,76 izvora/km²) padine. Najmanju gustoću izvora imaju sjeverne (4,94 izvora/km²), zapadne (5,64 izvora/km²) i sjeverozapadne padine (4,33 izvora/km²; Tab. 4.4.4.1; Sl. 4.4.4.2; Sl. 4.4.4.3).

Tab. 4.4.4.1. Broj izvora i gustoća izvora prema orijentaciji padina

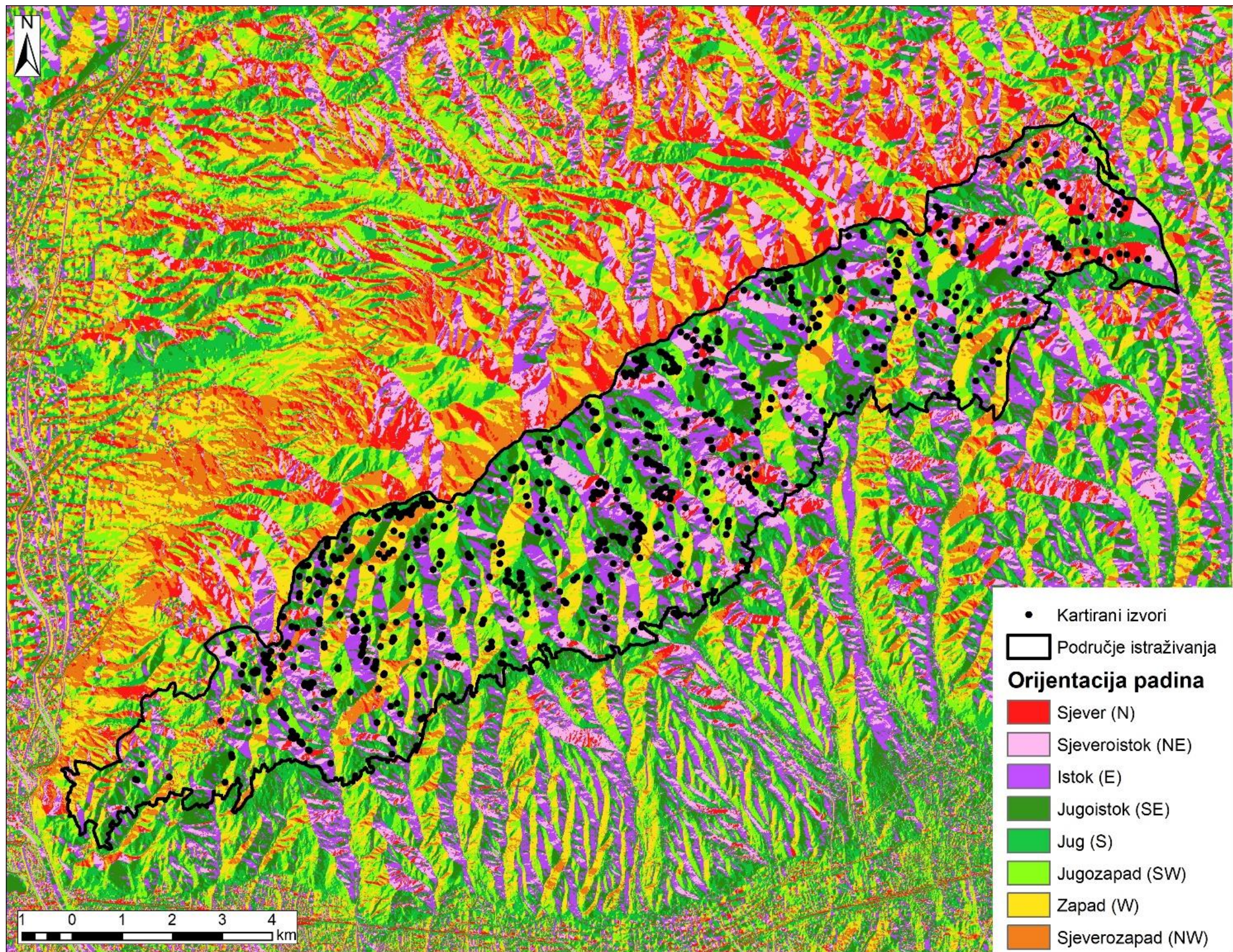
Orijentacija padina	Broj izvora	Udio izvora (%)	Površina (km ²)	Udio površine (%)	Gustoća izvora (izvori/km ²)
Sjever (N)	21	2,33	4,25	4,97	4,94
Sjeveroistok (NE)	129	14,33	10,02	11,73	12,87
Istok (E)	203	22,56	16,42	19,22	12,36
Jugoistok (SE)	185	20,56	15,43	18,06	11,99
Jug (S)	146	16,22	12,83	15,02	11,38
Jugozapad (SW)	139	15,44	11,82	13,83	11,76
Zapad (W)	58	6,44	10,28	12,04	5,64
Sjeverozapad (NW)	19	2,11	4,39	5,14	4,33
ukupno	900	100	85,45	100,00	10,53



Sl. 4.4.4.1. Udio orijentacija padina istraživanog područja



Sl. 4.4.4.2. Broj izvora prema orijentaciji padina (lijevo) i gustoća izvora prema orijentaciji padina (desno)

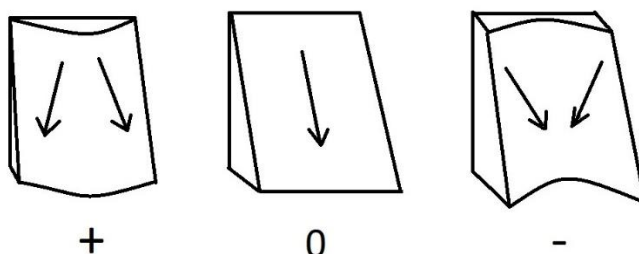


Sl. 4.4.4.3. Položaj izvora s obzirom na ekspoziciju padina

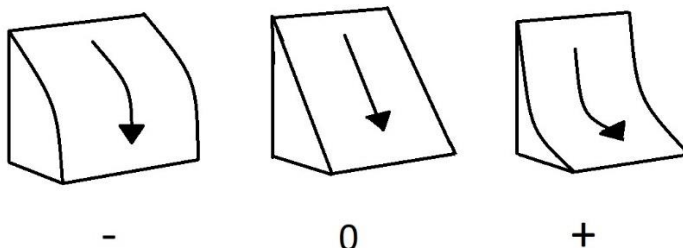
4.4.5. Zakrivljenost padina

Pojam zakrivljenosti padine odnosi se na njezin geometrijski oblik koji je rezultat endogenih i egzogenih geomorfoloških procesa (Marković, 1983; Radoš i dr., 2012). Zakrivljenost padina prostora istraživanja i prostorni raspored izvora na njima analizirani su s obzirom na njihovu poprečnu i uzdužnu zakrivljenost zasebno.

Poprečna zakrivljenost računa se kao zakrivljenost padine u sekanti okomitoj na smjer najvećeg nagiba (Parsons, 1988; Pahernik, 2007; Radoš i dr., 2012). Pozitivna vrijednost ukazuje na divergentni oblik padine, a negativna na konvergentni, dok vrijednost 0 (ili oko 0) označava zaravnjenu (pravocrtnu) padinu (Parsons, 1988; Sl. 4.3.5.1). Uzdužna zakrivljenost odnosi se na zakrivljenost padina duž linija okomitih na izohipse, odnosno u smjeru najvećeg nagiba (Pahernik, 2007; Radoš i dr., 2012). Pozitivne vrijednosti ukazuju na konkavni oblik padina, negativne na konveksni oblik padina, a vrijednosti 0 na zaravnjene padine (Parsons, 1988; Sl. 4.4.5.2).



Sl. 4.4.5.1. Podjela padina s obzirom na poprečnu zakrivljenost
(+ - divergentne; 0 - zaravnjene; - - konvergentne)



Sl. 4.4.5.2. Podjela padina s obzirom na uzdužnu zakrivljenost
(- - konveksne; 0 - zaravnjene; + konkavne)

Obje vrste zakrivljenosti padina izračunate su u GIS okruženju uz pomoć softvera ArcMap, korištenjem digitalnog modela reljefa. Svakom izvoru pridodane su vrijednosti zakrivljenosti padina na kojima se nalaze.

S obzirom na poprečnu zakrivljenost, na istraživanom području nešto je veći udio divergentnih padina u odnosu na konvergentne. Točnije, divergentne padine zauzimaju 44.4 % istraživanog područja (37,94 km²), a konvergentne 44.6 % (34,69 km²). Zaravnjene padine s obzirom na poprečnu zakrivljenost zauzimaju 12,82 km², odnosno 15 % istraživanog prostora (Tab. 4.4.5.1).

Najveći broj izvora pronađen je na konvergentnim padinama, njih 655, odnosno 72,78 %. Na konvergentnim padinama također je i najveća gustoća izvora, 18,88 izvora/km². Na divergentnim padinama nalazi se 181 izvor (20,11 %), dok su na zaravnjenim površinama 64 izvora (7,11 %). Gustoća izvora na divergentnim i zaravnjenim padinama vrlo je slična, 4,77 izvora/km² kod divergentnih te 4,99 izvora/km² kod zaravnjenih površina (Tab. 4.4.5.1).

Tab. 4.4.5.1. Broj izvora i gustoća izvora prema poprečnoj zakrivljenosti padina

Poprečna zakrivljenost	Broj izvora	Udio izvora (%)	Površina (km ²)	Udio površine (%)	Gustoća izvora (izvori/km ²)
konvergentne (-)	655	72,78	34,69	40,60	18,88
divergentne (+)	181	20,11	37,94	44,40	4,77
zaravnjene (-0,05 – 0,05)	64	7,11	1282	15,00	4,99
ukupno	900	100	85,45	100,00	10,53

Analizirajući uzdužnu zakrivljenost, konveksne padine zauzimaju 44,72 % istraživanog područja, odnosno 38,21 km². Konkavne padine zauzimaju 39,09 % istraživanog područja (33,39 km²), dok zaravnjene zauzimaju preostalih 16,19 %, odnosno 13,84 km² (Tab. 4.4.5.2).

Na konveksnim padinama nalazi se 305 izvora, odnosno njih 33,89 %. Gustoća izvora na konveksnim padinama je 7,89 izvora/km². Na konkavnim padinama nalazi se najviše izvora, njih 516, odnosno 57,33 %. Sukladno broju izvora i površini konkavnih padina, gustoća izvora na njima iznosi 15,45 izvora/km². Najmanji broj i gustoću izvora imaju zaravnjene padine. Na nima se nalazi 79 izvora, a gustoća iznosi 5,71 izvor/km² (Tab. 4.4.5.2).

Tab. 4.4.5.2. Broj izvora i gustoća izvora prema poprečnoj zakrivljenosti padina

Uzdužna zakrivljenost	Broj izvora	Udio izvora (%)	Površina (km ²)	Udio površine (%)	Gustoća izvora (izvori/km ²)
konveksne (-)	305	33,89	38,21	44,72	7,98
konkavne (+)	516	57,33	33,39	39,09	15,45
zaravnjene (-0,05 – 0,05)	79	8,78	13,84	16,19	5,71
ukupno	900	100	85,45	100,000	10,53

4.4.6. Indeks topografske vlažnosti (TWI)

Indeks topografske vlažnosti (*Topographical Wetness Index*; TWI) kvantificira topografske, odnosno reljefne značajke koje utječu na hidrološke procese. Na taj način se procjenjuje topografska (površinska) vlažnost prostora (Beven i Kirkby, 1979; Sørensen i dr., 2006). TWI se izražava kao:

$$TWI = \ln \frac{a}{\tan b}$$

gdje vrijednost a predstavlja površinu koja se odvodnjava kroz određenu točku (rastersku ćeliju) u prostoru u odnosu na veličinu (jediničnu duljinu) rasterske ćelije, a $\tan b$ predstavlja nagib padine u radijanima (Beven i Kirkby, 1979; Sørensen i dr., 2006).

Uz pomoć digitalnog modela reljefa izračunata je vrijednosti indeksa topografske vlažnosti za svaku ćeliju veličine 5 x 5 m na istraživanom prostoru. Vrijednosti indeksa su podijeljene u razrede intervala 1 (Tab. 4.4.6.1). Niske vrijednosti indeksa predstavljaju sušnija područja, a visoke vrijednosti vlažnija područja. Svakom izvoru pridodana je vrijednost indeksa prostora (ćelije rastera) na kojem se nalazi. Najniža vrijednosti TWI izvora je 2,64, a najveća 13,65. Prosječna vrijednost TWI svih izvora je 6,16, a medijalna vrijednost iznosi 592. Standardna devijacija vrijednosti TWI iznosi 1,71, a koeficijent varijacije 27,81 %.

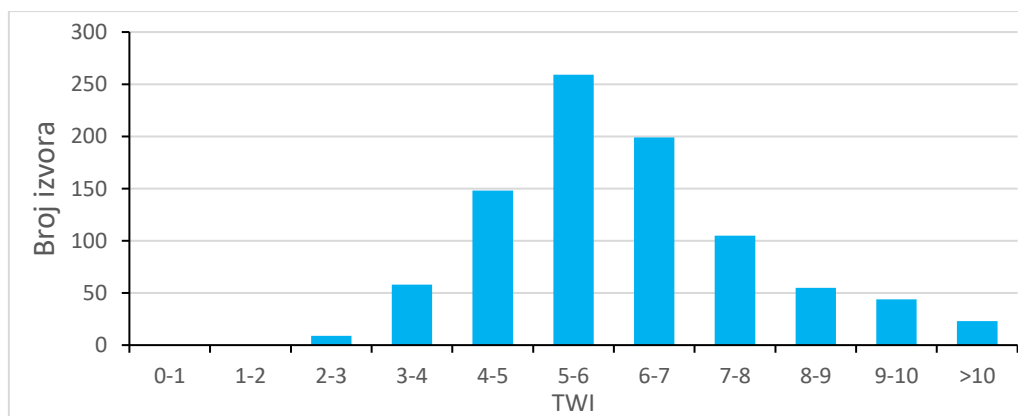
Područja s vrijednostima indeksa manjim od 2 zauzimaju tek 0,3 % istraživanog područja te na njima nije pronađen niti jedan izvor. Izvori se nalaze na područjima s vrijednostima TWI većom od 2 (točnije 2.64). Na područjima vrijednosti TWI između 2 i 3 pronađeno je 9 izvora (1 %). Ta područja zauzimaju 5,3 km², odnosno 6,2 % istraživanog područja. Sukladno tome, gustoća izvora za područja s TWI indeksom između 2 i 3 iznosi 1,7 izvora/km².

Broj izvora značajno raste s porastom vrijednosti TWI, sve do razreda s vrijednostima indeksa između 5 i 6 (Tab. 4.4.6.1). Na područjima s tim vrijednostima pronađeno je najviše izvora, njih 259 (Sl. 4.4.6.1). S daljnjim porastom vrijednosti TWI broj izvora kontinuirano pada. Na područjima s TWI većim od 10 nalaze se 23 izvora (2,56 %).

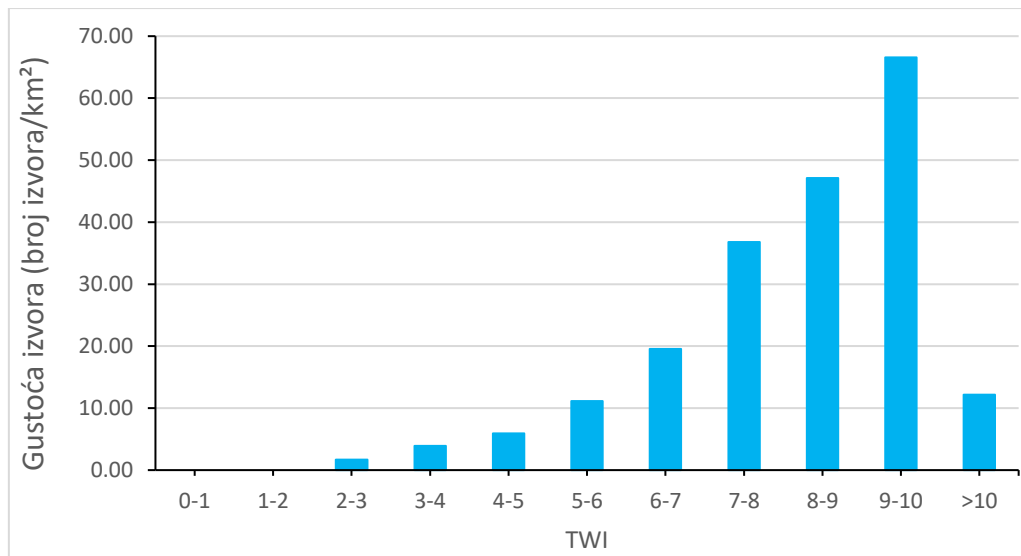
Stavimo li broj izvora svakog pojedinog razreda TWI u odnos s površinom svakog razreda dobit ćemo gustoću izvora za svaki razred TWI. Različito od samog broja izvora, gustoća izvora kontinuirano raste s porastom TWI, sve do razreda s vrijednostima indeksa između 9 i 10. Na područjima s tim vrijednostima TWI gustoća izvora iznosi 66,58 izvora/km² (Sl. 4.4.6.2).

Tab. 4.4.6.1. Broj izvora i gustoća izvora prema indeksu topografske vlažnosti prostora (TWI)

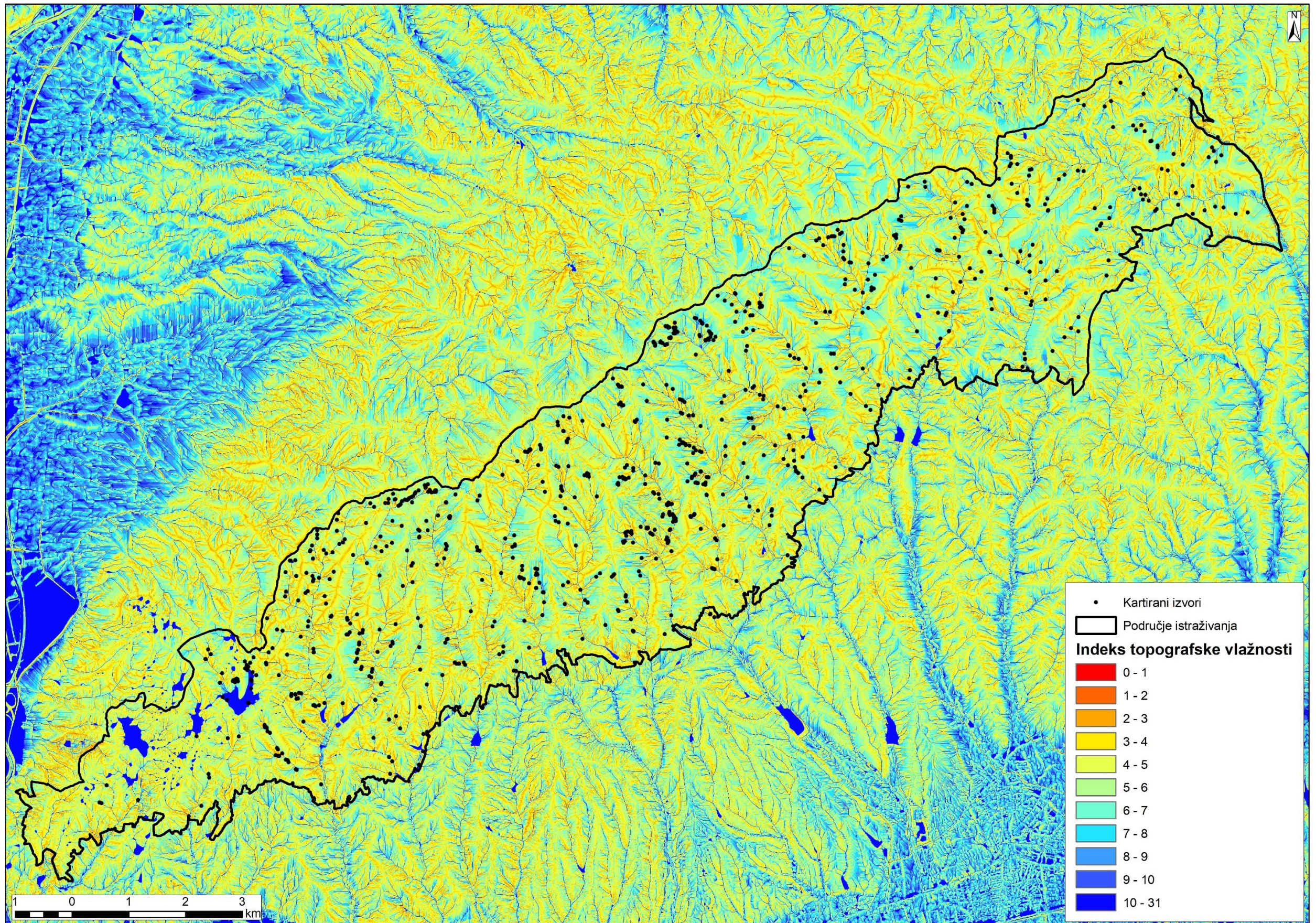
TWI	Broj izvora	Udio izvora (%)	Površina (km ²)	Udio površine (%)	Gustoća izvora (izvori/km ²)
0-1	0	0,00	0,001	0,001	0,00
1-2	0	0,00	0,25	0,29	0,00
2-3	9	100	5,30	6,20	1,70
3-4	58	6,44	14,83	17,35	3,91
4-5	148	16,44	25,07	29,34	5,90
5-6	259	28,78	2324	27,20	11,14
6-7	199	22,11	10,18	11,92	19,54
7-8	105	11,67	2,85	3,34	36,79
8-9	55	6,11	1,17	1,37	47,13
9-10	44	4,89	0,66	0,77	66,58
>10	23	2,56	1,89	2,21	12,18
ukupno	900	100	85,45	100	10,53



Sl. 4.4.6.1. Broj izvora prema indeksu topografske vlažnosti prostora (TWI)



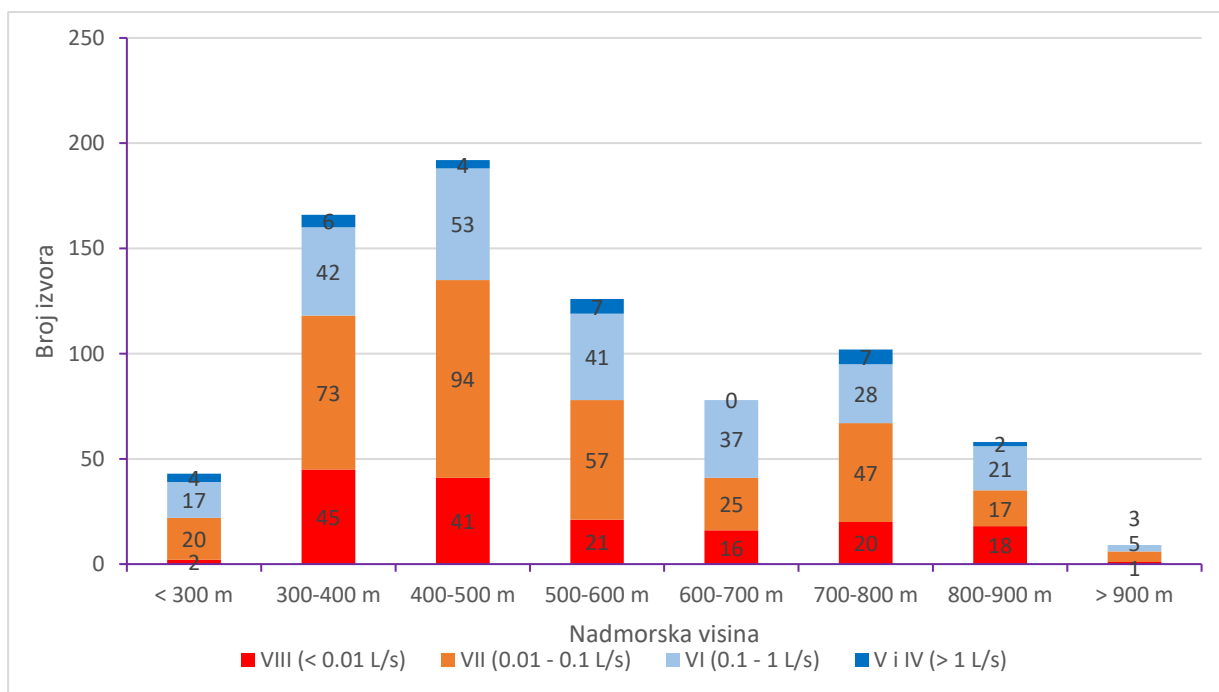
Sl. 4.4.6.2. Gustoća izvora prema indeksu topografske vlažnosti prostora (TWI)



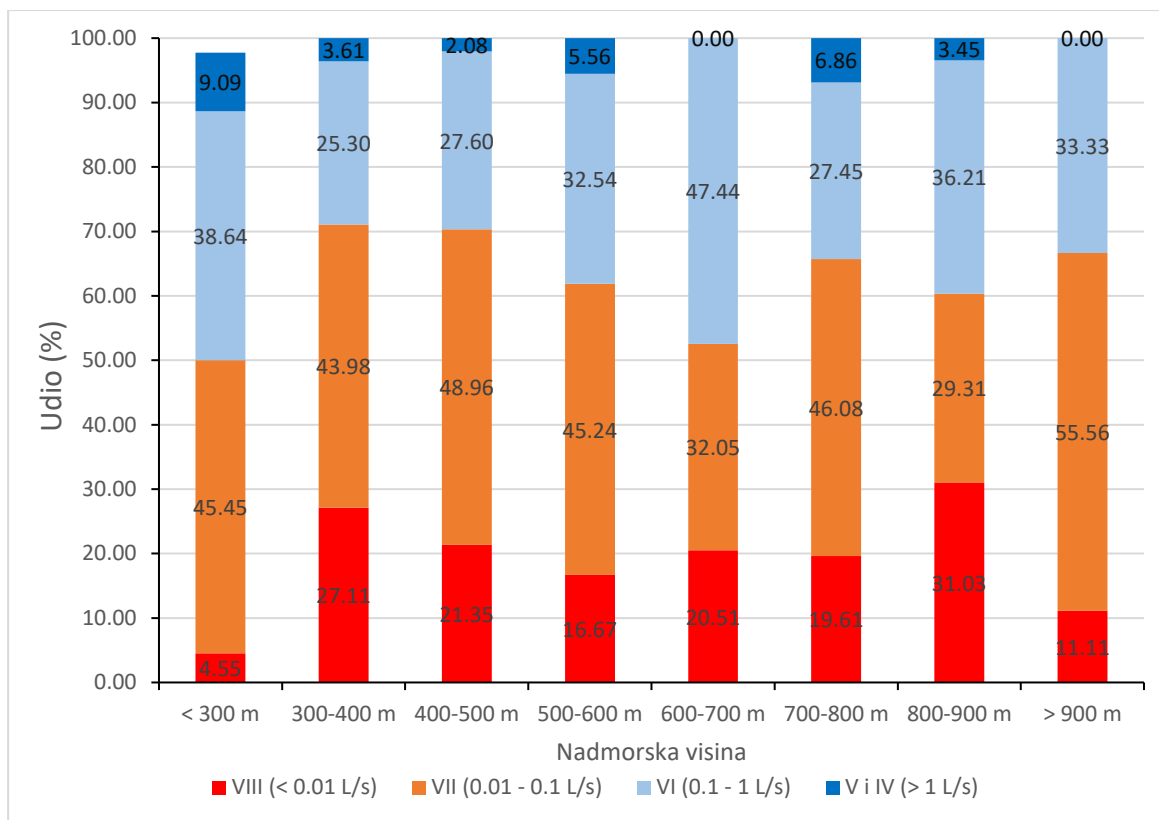
Sl. 4.4.6.3. Prostorni raspored izvora prema indeksu topografske vlažnosti prostora (TWI)

4.4.7. Kategorije izdašnosti izvora prema morfometrijskim obilježjima prostora

Udio kategorija izdašnosti i broj izvora svake kategorije analiziran je prema hipsometrijskim razredima. Najizdašniji izvori (kategorije V i IV, > 1 L/s) imaju najveći udio (9,09 %) na nadmorskim visinama nižim od 300 metara (Sl. 4.4.7.1), iako je njihov najveći broj pronađen na nadmorskim visinama od 500 do 600 metara, odnosno 700 do 800 metara (7 izvora u oba razreda; Sl. 4.4.7.1). U ostalim razredima, ti izvori imaju udio između 2,08 % i 6,86 %, dok na nadmorskim visinama od 600 do 700 metara te iznad 900 metara nema izvora s izdašnošću većom od 1 L/s. Izvori kategorije VI (0,1 – 1 L/s) zastupljeni su na svim nadmorskim visinama, udjelom najmanje na visinama između 300 i 400 metara (25,3 %), a najviše na visinama od 600 do 700 metara nad morem, 47.44 %, gdje su ujedno i najzastupljenija kategorija izvora (Sl. 4.4.7.2). Izvori kategorije VII (0,01 - 0,1 L/s) također su zastupljeni u svim hipsometrijskim razredima. U većini visinskih razreda ova kategorija je najzastupljenija, osim na nadmorskim visinama od 600 do 700 metara te 800 do 900 metara (Sl. 4.4.7.2). Izvori kategorije VIII, s najmanjom izdašnošću pristupni su u svim razredima nadmorske visine, a njihov udio varira od minimalnih 4,55 % na visinama ispod 300 metra nad morem do maksimalnih 31,03 % na nadmorskim visinama između 800 i 900 metara. Unatoč relativnom udjelu, njihov najveći apsolutni broj nalazi se na visinama od 300 do 400 metara, odnosno 400 do 500 metara nad morem (Sl. 4.4.7.1).

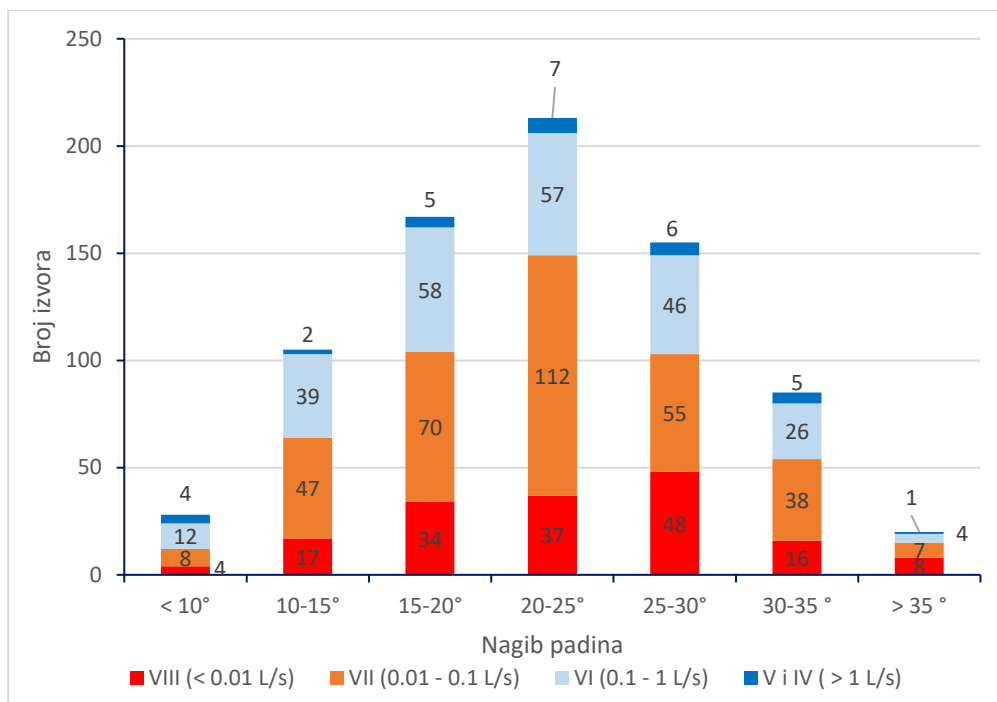


Sl. 4.4.7.1. Broj izvora različitih kategorija izdašnosti prema nadmorskoj visini

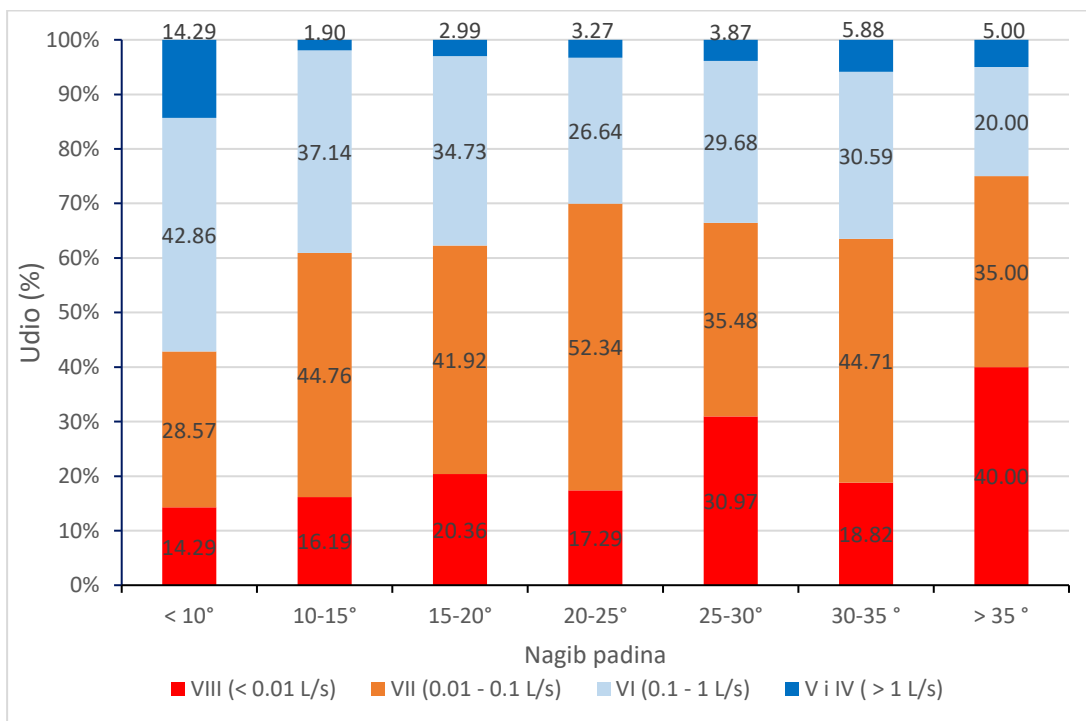


Sl. 4.4.7.2. Udio kategorija izdašnosti izvora prema nadmorskoj visini

Nagib padina također je uspoređen s udjelom i brojem izvora prema kategorijama izdašnosti. Iako je najveći broj izvora s izdašnošću većom od 1 L/s pronađen na nagibima između 20° i 25° (Sl. 4.4.7.3), njihov najveći relativni udio (14,29 %) je u području padina s najblažim nagibima (< 10°; Sl. 4.4.7.4). Slično vrijedi i za izvore kategorije izdašnosti VI (0,1 L/s – 1 L/s). Najviše (58) ih se nalazi na padinama nagiba između 15° i 20°, ali njihov najveći relativni udio (42,86 %) je na najblažim padinama, < 10°, gdje su i najzastupljeniji od svih kategorija izdašnosti. Najveći broj (112) i udio (52.34 %) izvora kategorije VII (0,01 – 0,1 L/s) je na padinama s nagibima između 20° i 25°. Izvori najslabije izdašnosti (kategorija VIII, < 0,01 L/s) najbrojniji su na nagibima od 25° do 30°, dok ih je najmanje na padinama najmanjih nagiba, < 10° (Sl. 4.4.7.3). Na najblažim padinama je i njihov najmanji udio, dok je njihov udio najveći na najstrmijim padinama, onim većim od 35° (Sl. 4.4.7.4).



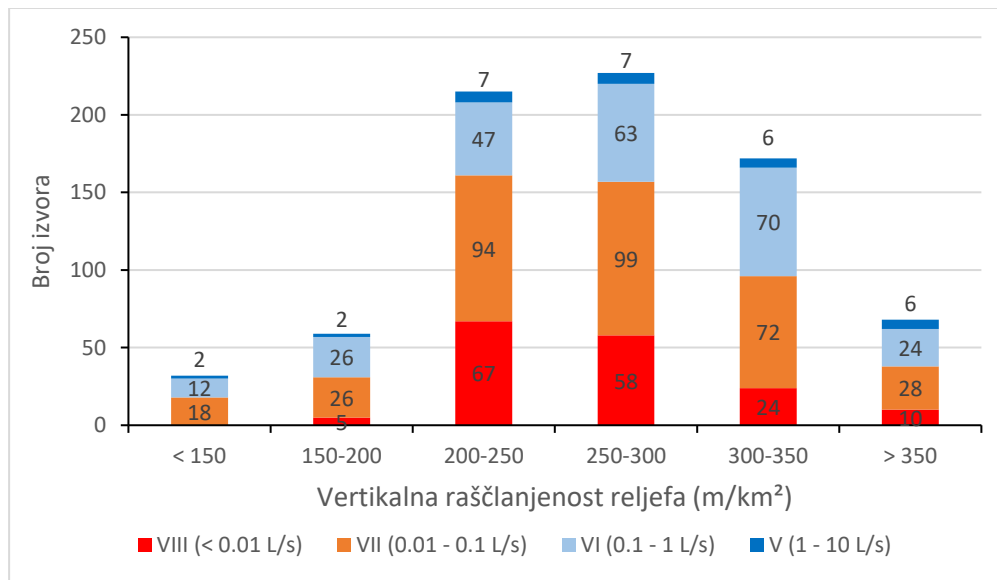
Sl. 4.4.7.3. Broj izvora različitih kategorija izdašnosti prema nagibu padina



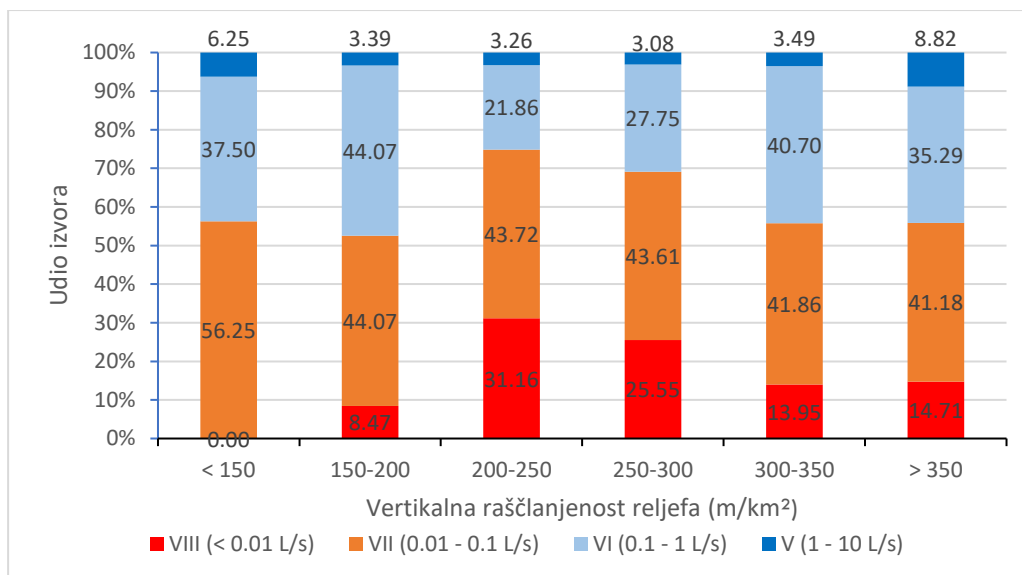
Sl. 4.4.7.4. Udio kategorija izdašnosti izvora prema nagibu padina

Broj i udio izvora različitih kategorija izdašnosti analiziran je i prema razredima vertikalne raščlanjenosti reljefa. Rezultati su pokazali kako se najveći broj i udio izvora najmanje izdašnosti

(kategorija VIII) nalazi na prostorima vertikalne raščlanjenosti između 200 i 250 m/km² (Sl. 4.4.7.5; Sl. 4.4.7.6). S druge strane, na područjima najmanjih vrijednosti vertikalne raščlanjenosti (< 150 m/km²) njihova prisutnost nije zabilježena. Na tim prostorima najveći je udio izvora kategorije VII (0,01 – 0,1 L/s), iako ih je u apsolutnom smislu najmanje zabilježeno na tim područjima. Najveći broj izvora kategorije VII u apsolutnom smislu zabilježen je na prostorima vertikalne raščlanjenosti između 250 i 300 m/km². Najveći broj izvora kategorije VI (0,1 – 1 L/s) nalazi se na prostorima vertikalne raščlanjenosti od 300 do 350 m/km² (Sl. 4.4.7.5), a njihov relativni udio najveći je na prostorima raščlanjenosti od 150 do 200 m/km² (Sl. 4.4.7.6). Najizdašniji izvori (V, > 1 L/s) brojčano su najzastupljeniji na prostorima između 200 i 300 m/km², gdje je u obje kategorije pronađeno 7 izvora. Međutim, i na prostorima s još većom vertikalnom raščlanjenosti pronađeno je po 6 izvora u svakoj kategoriji, a njihov najveći relativni udio je upravo na područjima najveće vertikalne raščlanjenosti (> 350 m/km²) (Sl. 4.4.7.5; Sl. 4.4.7.6).



Sl. 4.4.7.5. Broj izvora različitih kategorija izdašnosti prema razredima vertikalne raščlanjenosti reljefa



Sl. 4.4.7.6. Udio kategorija izdašnosti izvora prema razredima vertikalne raščlanjenosti reljefa

Zbog složenosti odnosa hidroloških obilježja izvora i prostornih (morfometrijskih i geoloških) obilježja prostora istraživanja provedena je statistička analiza varijance (ANOVA). ANOVA-om se određuju razlike između promatranih skupina (kategorija izdašnosti) korištenjem relativne varijance srednjih vrijednosti varijabli i varijance unutar skupina (*One-way ANOVA in SPSS Statistics*, n.d.). Cilj analize bio je provjeriti koje varijable (prostorna obilježja) imaju značajne razlike između različitih kategorija izdašnosti. Zbog osjetljivosti ANOVA-e s jednim promjenjivim faktorom na broj članova svake grupe (kategorije izdašnosti) korištena je i Welch – ANOVA, koja je manje osjetljiva na spomenute razlike (Welch, 1951). Rezultati obje analize tumače se korištenjem p-vrijednosti. Ukoliko je p-vrijednost $< 0,05$, to znači da postoji vjerojatnost od 95 % da su izračunate razlike statistički značajne, odnosno da nisu rezultat pogreške u uzorkovanju ili slučajnosti. Što je p-vrijednost niža to je rezultat statistički značajniji.

Rezultati i jedne i druge metode ANOVA su gotovo isti. Pokazali su kako značajne razlike između kategorija izdašnosti postoje samo u slučaju nagiba padina i udaljenosti od rasjeda. P-vrijednosti tih varijabli bile su $< 0,05$, što je ukazalo na statistički značajnu razliku u srednjim vrijednostima između kategorija izdašnosti. Treba napomenuti kako je p-vrijednost indeksa topografske vlažnosti (TWI) blizu granične od 0,05 (Tab.4.4.7.1).

Tab. 4.4.7.1. P-vrijednosti prostornih obilježja dobivene statističkom analizom ANOVA

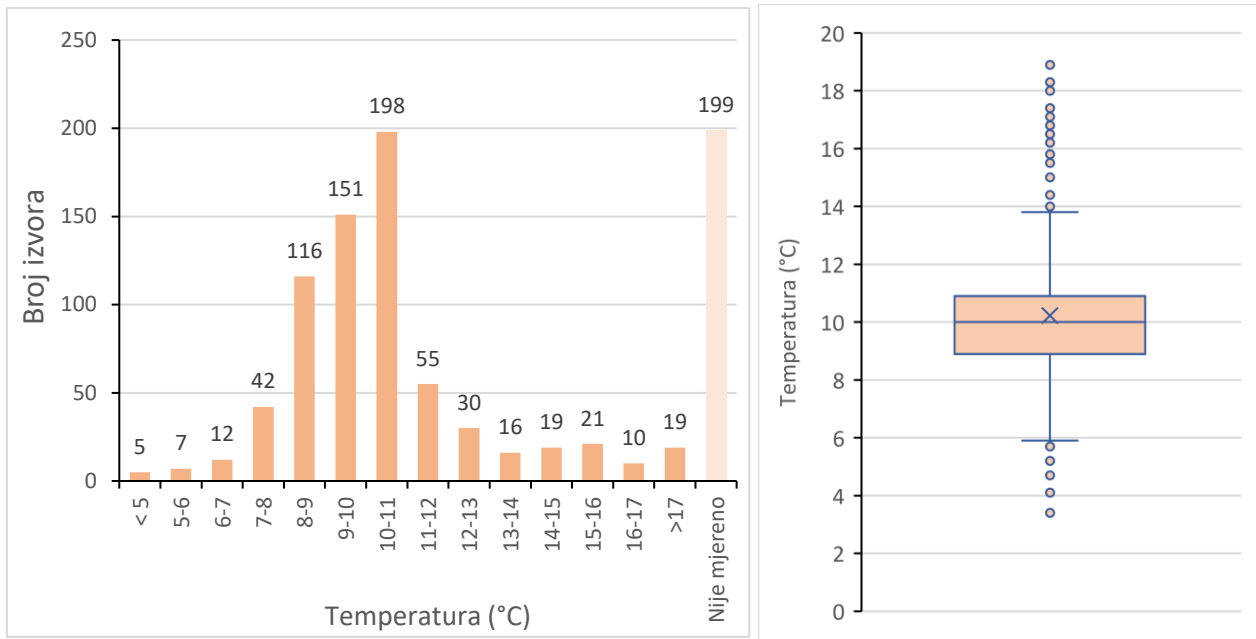
	Nadmorska visina	Nagib	Vertikalna raščlanjenost	Orijentacija padina	Poprečna zakrivljenost	Uzdužna zakrivljenost	TWI	Udaljenost od rasjeda	Udaljenost od lineamenta
p-vrijednost	0,347	0,023	0,534	0,157	0,451	0,962	0,051	0,010	0,199
p-vrijednost (Welch)	0,351	0,029	0,597	0,150	0,368	0,951	0,075	0,003	0,179

4.5. Fizikalno-kemijska obilježja izvorske vode

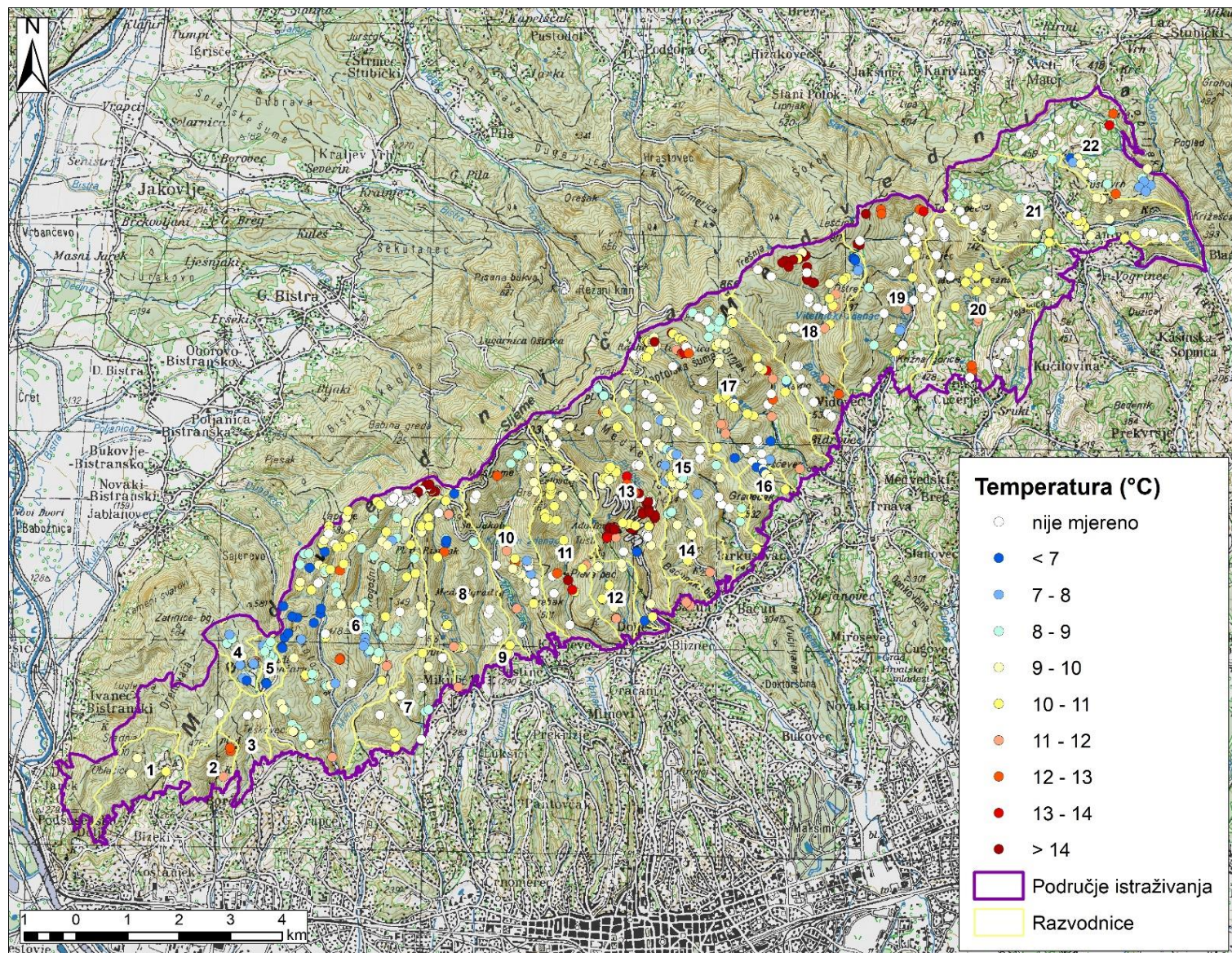
4.5.1. Temperatura

Temperatura izvorske vode mjerena je na 701 izvoru od 900 kartiranih. Terenski izmjerene temperature vode istraživanih izvora kreću se od minimalnih 3,4 °C do maksimalne vrijednosti od 18,9 °C. Unatoč tako širokom apsolutnom rasponu, treba napomenuti kako se oko 80 % izmjerenih temperatura kreće između vrijednosti 7 i 12 °C (Sl. 4.5.1.1), što otprilike odgovara rasponu srednjih godišnjih temperatura zraka na istraživanom području. Srednje godišnje temperature zraka u razdoblju od 1991. do 2020. iznose 7,4 °C na meteorološkoj stanici Puntijarka te 11,9 °C na stanici Zagreb Maksimir (DHMZ, 2024). Srednja vrijednost svih izmjerenih temperatura vode je 10,23 °C, a medijalna 10 °C. Standardna devijacija izmjerenih temperatura iznosi 2,36 °C, a koeficijent varijacije 23,12 %. Najveći broj izvora, njih 198 (28,25 % mjerenih), ima temperature vode između 10 i 11 °C. Potom slijede izvori s temperaturom od 9 do 10 °C (151 izvor, 21,52 % mjerenih izvora) te 8 do 9 °C (116 izvora, 16,55 %; Sl. 4.5.1.1).

Kada analiziramo prostorni raspored izmjerenih vrijednosti temperature vidljivo je kako su najniže vrijednosti izmjerene na sjeverozapadnom dijelu potoka Vrapčaka, te na prostoru potoka Jezeranec i Javorščak. Najviše vrijednosti pojavljuju se u središnjem dijelu oko Sljemenske ceste, u poriječju Blizneca te u vršnim dijelovima poriječja potoka Mikulić i Bidrovca (Sl. 4.5.2.2). Treba napomenuti kako vrijednosti temperature uvelike ovise o datumu mjerenja i atmosferskim uvjetima, pogotovo jer se većinom radi o izvorima kod kojih je prisutno relativno plitko podzemno otjecanje. Zbog toga ovakve rezultate treba uzeti s oprezom. Većina izvora na malom, grupiranom prostoru kartirana je istovremeno, kao što su im i izmjerene vrijednosti pH i temperature. Ekstremno niske vrijednosti mjerene su u zimi, a visoke u ljeti, što je najvjerojatniji razlog ovakvog prostornog rasporeda.



Sl. 4.5.1.1. Broj izvora prema izmjerenim temperaturama vode (lijevo) i raspon izmjerenih temperatura izvorske vode (desno)



Sl. 4.5.1.2. Prostorni raspord izvora prema izmjerenim temperaturama vode

Podloga: Topografska karta mjerila 1:100 000 (DGU, 2024)

Na karti brojkama su označena poriječja potoka: 1 – Dolje; 2 – Dubravica; 3 – Mačkovec; 4 – Jezeranec; 5 – Javorščak; 6 – Vrapčak (i Mikulić); 7 – Kustošak; 8 – Črnomerec (Veliki i Mali potok); 9 – Kuniščak; 10 – Kraljevec; 11 – Pusti dol; 12 – Gračec; 13 – Bliznec; 14 – Bačun; 15 – Markuševec; 16 – Štefanovec; 17 – Trnava (Stari i Novi potok); 18 – Bidrovec; 19 – Vidovec; 20 – Čučerje; 21 – Vukov dol; 22 – Suhopot.

4.5.2. Vrijednosti pH

Broj koji služi kao mjera kiselosti, odnosno lužnatosti vodenih otopina je pH vrijednost (pH, *Hrvatska enciklopedija*) Ona predstavlja negativni logaritam ionske aktivnosti (koncentracije) vodikovih iona (Clark, 2015):

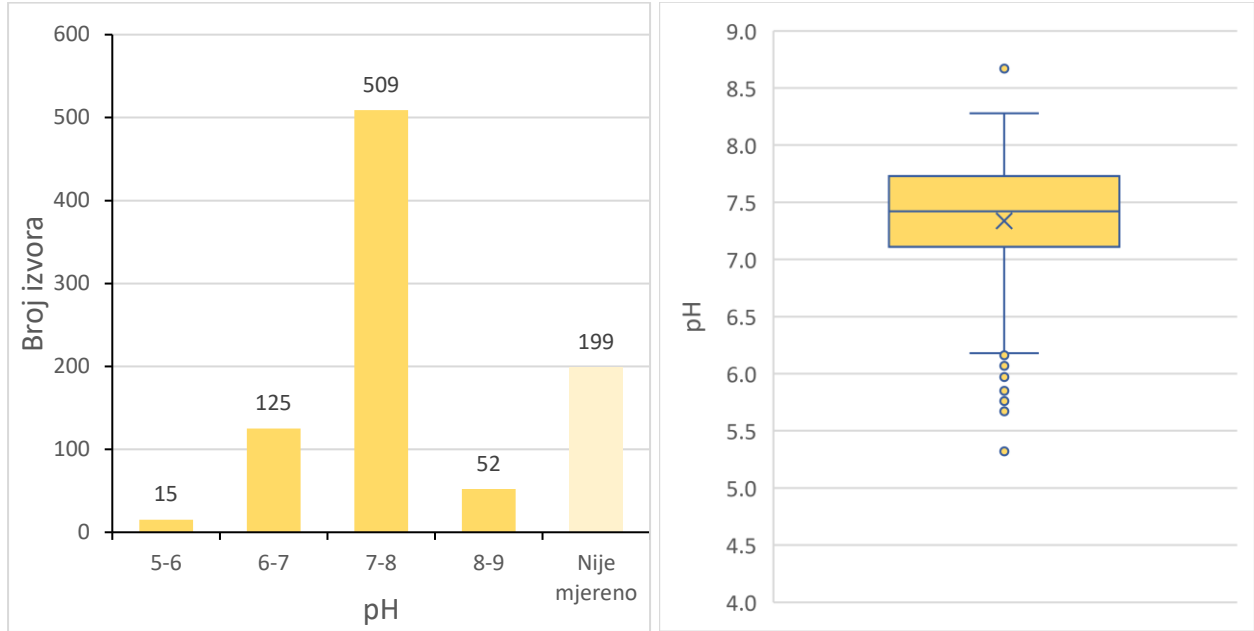
$$\text{pH} = -\log a_{\text{H}^+} .$$

Vrijednosti pH kreću se od 0 do 14. Vrijednost 7 predstavlja neutralnu otopinu, dok vrijednosti manje od 7 predstavljaju kiselu otopinu. U njima je koncentracija slobodnih H^+ iona veća od OH^- iona. Vrijednosti veće od 7 predstavljaju lužnate otopine. U takvim otopinama je koncentracija slobodnih H^+ iona manja od koncentracije OH^- iona.

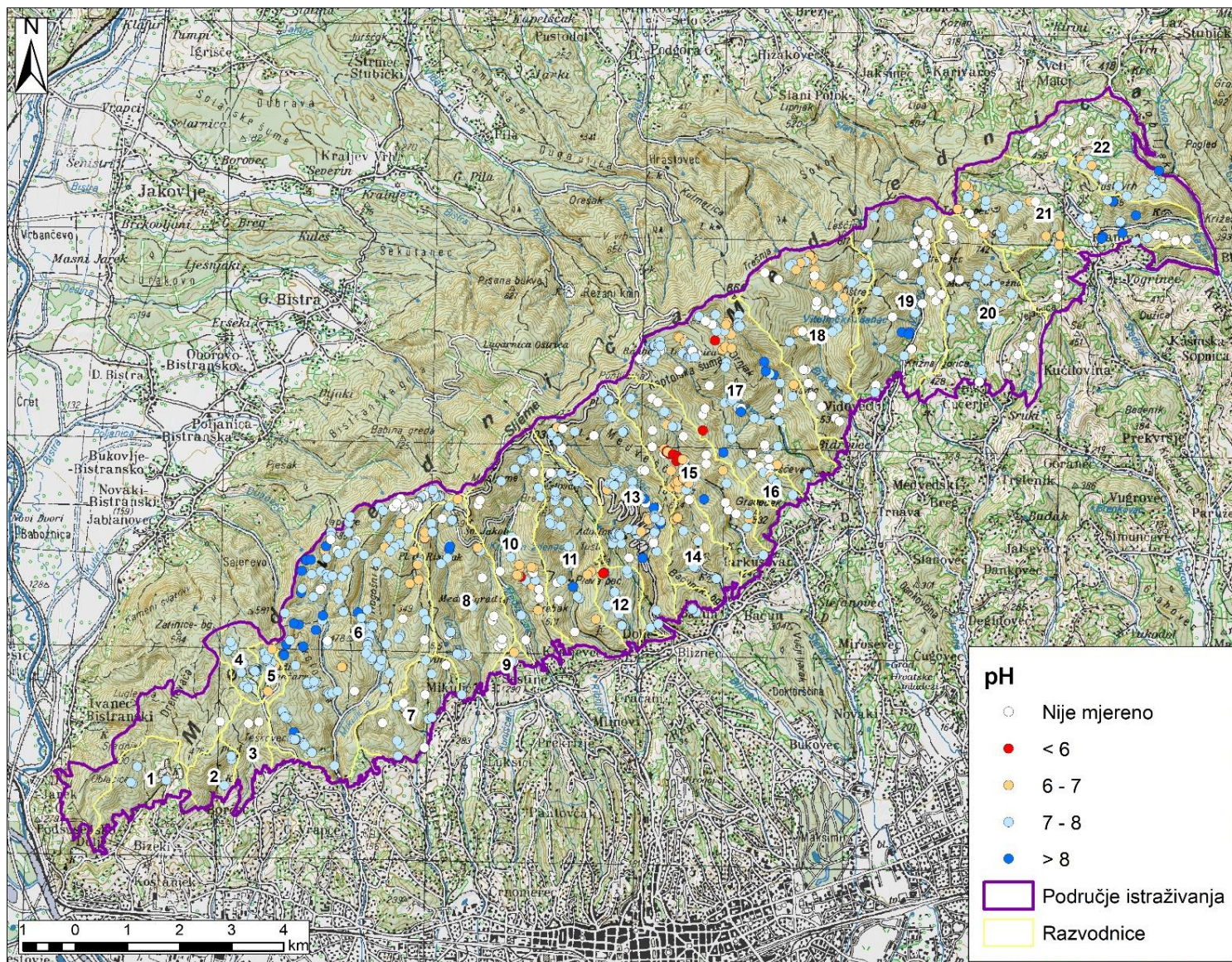
Na 701 izvoru izmjerena je vrijednost pH vode u trenutku kartiranja. Izmjerene vrijednosti kreću se od minimalnih 5,32 do maksimalnih 8,67. Srednja vrijednost izmjerenih vrijednosti pH je 7,34, a medijalna 7,42. Standardna devijacija izmjerenih vrijednosti pH iznosi 0,52, a koeficijent varijacije 7,13 %. U 93 % slučajeva, izmjerene vrijednosti pH izvorske vode bile su između 6,5 i 8,5 (Sl. 4.5.2.1), što odgovara preporukama za pitku vodu Svjetske zdravstvene organizacije (*pH in Drinking-water*, 2007) i Agencije za zaštitu okoliša SAD-a (*Drinking Water Regulations and Contaminants*, n.d.) te propisima Ministarstva zdravstva i socijalne skrbi Republike Hrvatske (*Pravilnik o zdravstvenoj ispravnosti vode za piće*, 2008).

Na 15 izvora (2,14 % mjerenih) izmjerene su vrijednosti pH između 5 i 6. Na 125 izvora (17,38 %) izmjerene su vrijednosti pH između 6 i 7. Na najvećem broju izvora, njih 509 (72,61 %), izmjerene su pH vrijednosti vode između 7 i 8. Na 52 istraživana izvora (7,42 %) izmjerene vrijednosti pH bile su između 8 i 9 (Sl. 4.5.2.1).

Kada analiziramo prostorni raspored izmjerenih vrijednosti pH vidljivo je kako su najviše vrijednosti izmjerene na sjeverozapadnom dijelu potoka Vrapčaka, te gdje u poriječjima ostalih potoka središnjeg dijela istraživanog područja, kao i na području Vukov dola na krajnjem sjeveroistoku. Najniže vrijednosti pojavljuju se u središnjem dijelu, posebno poriječje Markuševca (Sl. 4.5.2.2). Treba napomenuti kako vrijednosti pH uvelike ovise o hidrološkim uvjetima, odnosno količini oborina neposredno prije terenskog izlaska, kao i topljenju snijega. To je u ovom istraživanju izraženo jer se većinom radi o izvorima kod kojih je, pretpostavlja se, prisutno relativno plitko podzemno otjecanje. Zbog toga ovakve rezultate treba uzeti s oprezom.



Sl. 4.5.2.1. Broj izvora prema izmjenjenim vrijednostima pH vode (lijevo) i raspon izmjenjenih vrijednosti pH izvorske vode (desno)



Sl. 4.5.2.2. Prostorni raspored izvora prema vrijednosti pH vode

Izvor: podloga Topografska karta mjerila 1:100 000 (DGU, 2024)

Na karti brojkama su označena porječja potoka: 1 – Dolje; 2 – Dubravica; 3 – Mačkovec; 4 – Jezeranec; 5 – Javorščak; 6 – Vrapčak (i Mikulić); 7 – Kustošak; 8 – Črnomerec (Veliki i Mali potok); 9 – Kuniščak; 10 – Kraljevec; 11 – Pusti dol; 12 – Gračec; 13 – Bliznec; 14 – Bačun; 15 – Markuševac; 16 – Štefanovec; 17 – Trnava (Stari i Novi potok); 18 – Bidrovec; 19 – Vidovec; 20 – Čučerje; 21 – Vukov dol; 22 – Suhopot.

4.5.3. Električna provodnost (EC)

Električna provodnost (EC, oznaka σ ; stariji naziv: specifična električna vodljivost), fizikalna je veličina koja opisuje svojstvo tvari (vode) da provodi električnu struju. Izražava se mjernom jedinicom S/m (siemens po metru), odnosno $\mu\text{S}/\text{cm}$ (mikrosiemens po centimetru). Određuje se mjerenjem električne vodljivosti G , duljine l električnog vodiča u smjeru protjecanja električne struje i površine njegova poprečnog presjeka P (*Hrvatska enciklopedija*, 2013):

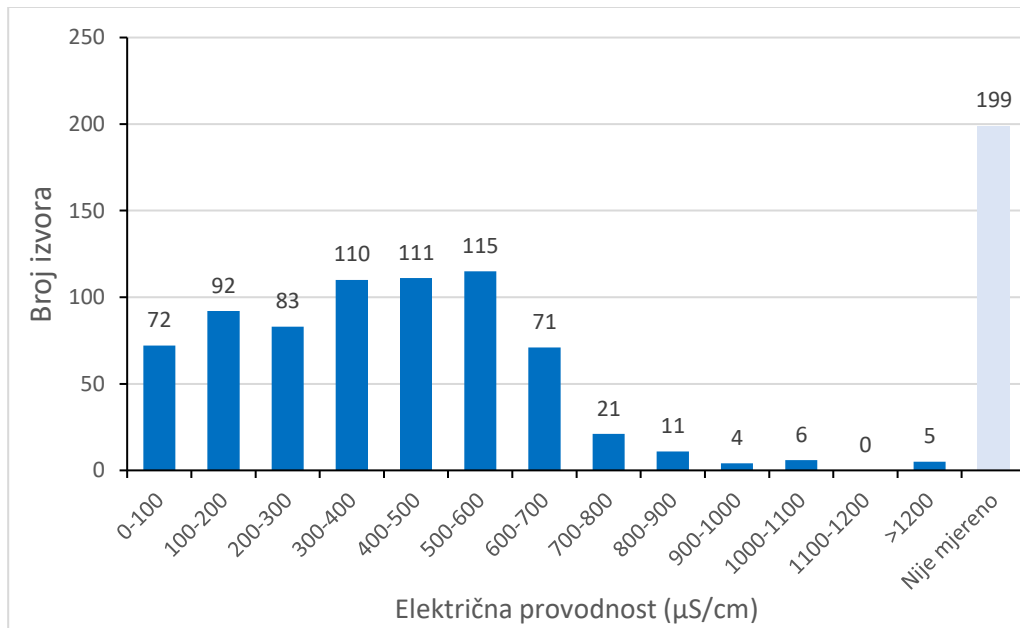
$$\sigma = \frac{G \times l}{P}$$

Električna provodnost proporcionalna je količini iona prisutnih u otopini te zbog toga možemo preko njene vrijednosti procijeniti količinu otopljenih krutih tvari (*total dissolved solids*, *TDS*), koje su većinom anorganskog sastava. Za većinu podzemnih voda vrijedi odnos da je vrijednost EC otprilike dvostruko veća od vrijednosti TDS-a izraženoj u miligramima po litri ili ppm (dijelova na milijun, eng. *parts per million*) (Clarke, 2015). Sukladno tome, niže prikazani rezultati mjerenja EC pokazuju i relativne odnose otopljenih krutih tvari izvorske vode.

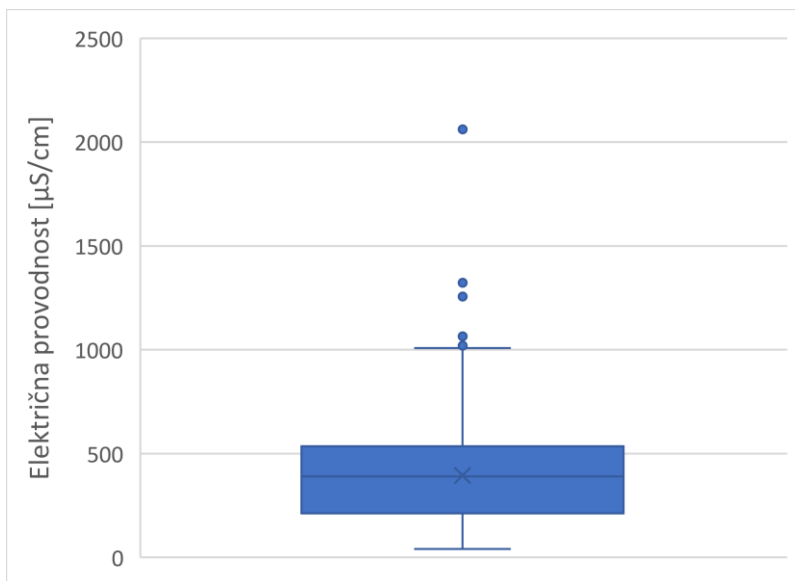
Vrijednosti EC vode mjerena je na 701 izvoru (Sl. 4.5.3.1). Mjerene vrijednosti pokazale su relativno veliku raznolikost. Najmanja izmjerena vrijednost bila je $41 \mu\text{S}/\text{cm}$, a najveća $2062 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Sl. 4.5.3.2). Srednja vrijednost svih mjerenja iznosila je $394 \mu\text{S}/\text{cm}$, a medijalna $390 \mu\text{S}/\text{cm}$. Standardna devijacija izmjerenih vrijednosti EC vode iznosi $230,19 \mu\text{S}/\text{cm}$, a koeficijent varijacije $58,35 \%$. Prema propisima Ministarstva zdravstva i socijalne skrbi Republike Hrvatske (*Pravilnik o zdravstvenoj ispravnosti vode za piće*, 2008) voda za piće ne smije prelaziti vrijednost od $2500 \mu\text{S}/\text{cm}$ pri temperaturi od $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Međutim, voda za piće bez tretiranja preporuča se samo ako ima manje vrijednosti EC od $800 \mu\text{S}/\text{cm}$ (*Water quality standards*, 2013; *Water quality standards*, 2018). Vrijednosti EC manje od $800 \mu\text{S}/\text{cm}$ prema terenskim mjerenjima ima $96,29 \%$ izvora, odnosno 675 izvora od ukupno 701 mjenog.

Vrijednosti EC manje od $100 \mu\text{S}/\text{cm}$ imala su 72 izvora, od 100 do $200 \mu\text{S}/\text{cm}$ 92 izvora, a od 200 do $300 \mu\text{S}/\text{cm}$ 83 izvora. Najveći broj izvora, njih 115, imao je EC između 500 i $600 \mu\text{S}/\text{cm}$, a tek nešto manje izvora imalo je vrijednosti EC između 300 i $400 \mu\text{S}/\text{cm}$ (110 izvora), odnosno 400 i $500 \mu\text{S}/\text{cm}$ (111 izvora; Sl. 4.5.3.1).

Vrijednosti EC od 600 do 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ imalo je 71 izvor. Voda 21 izvora imala je vrijednosti EC između 700 i 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a na 11 izvora između 800 i 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ukupno 15 izvora je imalo EC veću od 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$, od čega 5 iznad 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Sl. 4.5.3.1).



Sl. 4.5.3.1. Broj izvora prema vrijednostima električne provodnosti (EC)



Sl. 4.5.3.2. Raspon izmjerenih vrijednosti električne provodnosti (EC) izvorske vode

4.5.4. Fizikalno-kemijska obilježja vode prema litostratigrafskim jedinicama

Litološka obilježja vodonosnika jedan su od najvažnijih čimbenika koji utječu na fizikalno-kemijska obilježja vode, zajedno s vremenom zadržavanja vode u podzemlju, ali i drugim obilježjima kao što su ljudski utjecaj, biokemijski procesi, klimatološki uvjeti i dr. (Clark, 2015). Vrijednosti EC i pH izvorske vode analizirani su prema litostratigrafskim jedinicama izvora s ciljem utvrđivanja potencijalnih razlika.

Izvorska voda na području litostratigrafske jedinice miocenskih konglomerata, šljunaka i pijesaka ($1M^1_2$) pokazala je relativno velike raspone vrijednosti EC. Minimalna izmjerena vrijednost bila je 71 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a maksimalna 817 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tab. 4.5.4.1). Prosječna vrijednost iznosila je 485 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a medijalna 509 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Vrijednosti pH na području iste litostratigrafske jedinice također su pokazale relativno veliki raspon, od minimalnih 6.01 do maksimalnih 8.07. Prosječna vrijednost pH iznosi 7,23, a medijalna 7,31 (Tab. 4.5.4.1).

Na području litostratigrafske jedinice miocenskih litotamnijskih vapnenaca, lapora i pješčenjaka ($2M^2_2$) minimalna izmjerena vrijednost EC bila je 78 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a maksimalna 635 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Iako je najniža vrijednost bila 78 $\mu\text{S}/\text{cm}$, na kutijastom grafikonu (*box plot*) koji prikazuje vrijednosti EC ta vrijednost je označena kao iznimka (*outlier*), te je kao minimum skupa uzeta vrijednost od 380 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Sl. 4.5.4.1). Prosječna vrijednost iznosi 458 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a medijalna 464 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Vrijednosti pH na području iste litostratigrafske jedinice pokazale su relativno veliki raspon, od minimalnih 6,01 do maksimalnih 8,07. Međutim, minimalna vrijednost pH je i u ovom slučaju uzeta kao iznimka te je kao minimalni pH skupa u kutijastom grafikonu uzeta vrijednost od 7,11 (Sl. 4.5.4.2). Prosječna vrijednost pH na ovoj litostratigrafskoj jedinici iznosi 7,23, a medijalna 7,31 (Tab. 4.5.4.1).

Na području litostratigrafske jedinice miocenskih paleogenskih konglomerata, pješčenjaka i lapora (Pc) nalazi se samo 7 izvora. Minimalna izmjerena vrijednost EC na području te litostratigrafske jedinice bila je 107 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a maksimalna 452 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tab. 4.5.4.1). Prosječna vrijednost iznosila je 294 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a medijalna 335 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Vrijednosti pH na području iste litostratigrafske jedinice kreću se od minimalnih 6.65 do maksimalnih 7,22 (Sl. 4.5.4.2). Prosječna vrijednost pH iznosi 6.96, a medijalna 7,11 (Tab. 4.5.4.1).

Na području gornjokrednih breča, konglomerata i vapnenaca ($3,4K^3_2$) minimalna izmjerena vrijednost EC bila je 53 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a maksimalna 744 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tab. 4.5.4.1). Unatoč tim mjerenjima, na kutijastom

grafikonu (*box plot*) koji prikazuje vrijednosti EC najniže četiri izmjerene vrijednosti označene su kao iznimke (*outliers*), kao i maksimalna izmjerena vrijednost (Sl. 4.5.4.1). Kao minimum skupa uzeta je vrijednost od 350 $\mu\text{S/cm}$. Prosječna vrijednost iznosi 493 $\mu\text{S/cm}$, a medijalna 530 $\mu\text{S/cm}$. Vrijednosti pH izvorske vode na području iste litostratigrafske jedinice pokazale su relativno veliki raspon, od minimalnih 5,98 do maksimalnih 8.26. Međutim, 4 najmanje izmjerene vrijednosti pH su i u ovom slučaju uzete kao iznimke te je kao minimalni pH skupa u kutijastom grafikonu uzeta vrijednost od 6,58 (Sl. 4.5.4.2). Prosječna vrijednost pH na ovoj litostratigrafskoj jedinici iznosi 7,23, a medijalna 7,31 (Tab. 4.5.4.1).

S druge strane, na gornjokrednim naslagama koje čine konglomerati, vapnenci i lapori (K^3_2) minimalna izmjerena vrijednost EC na 11 istraženih izvora bila je 281 $\mu\text{S/cm}$, a maksimalna 557 $\mu\text{S/cm}$ (Tab. 4.5.4.1). Prosječna vrijednost iznosila je 405 $\mu\text{S/cm}$, a medijalna 420 $\mu\text{S/cm}$. Izmjerene vrijednosti pH na području iste litostratigrafske jedinice kreću se od minimalnih 6,58 do maksimalnih 7,99 (Sl. 4.5.4.2). Prosječna vrijednost pH iznosi 7,3, a medijalna 7,11 (Tab. 4.5.4.1).

Na području srednjetrijskih karbonatnih stijena, pretežno dolomita (oznaka T_2) minimalna izmjerena vrijednost EC bila je 390 $\mu\text{S/cm}$, a maksimalna 723 $\mu\text{S/cm}$. Unatoč relativno visokoj izmjerenoj minimalnoj vrijednosti, na kutijastom grafikonu (*box plot*) koji prikazuje vrijednosti EC (Sl. 4.5.4.1) najniže tri izmjerene vrijednosti označene su kao iznimke (*outliers*). Kao minimum skupa uzeta je vrijednost od 590 $\mu\text{S/cm}$. Prosječna vrijednost iznosi 602 $\mu\text{S/cm}$, a medijalna 626 $\mu\text{S/cm}$. Vrijednosti pH izvorske vode na području iste litostratigrafske jedinice pokazale su relativno mali raspon, od minimalnih 7,16 do maksimalnih 8.1 (Tab. 4.5.4.1). Međutim, dvije najveće izmjerene vrijednosti pH u ovom slučaju uzete su kao iznimke te je kao maksimalni pH skupa u kutijastom grafikonu uzeta vrijednost od 7,81 (Sl. 4.5.4.2). Prosječna vrijednost pH na ovoj litostratigrafskoj jedinici iznosi 7,48, a medijalna 7,46.

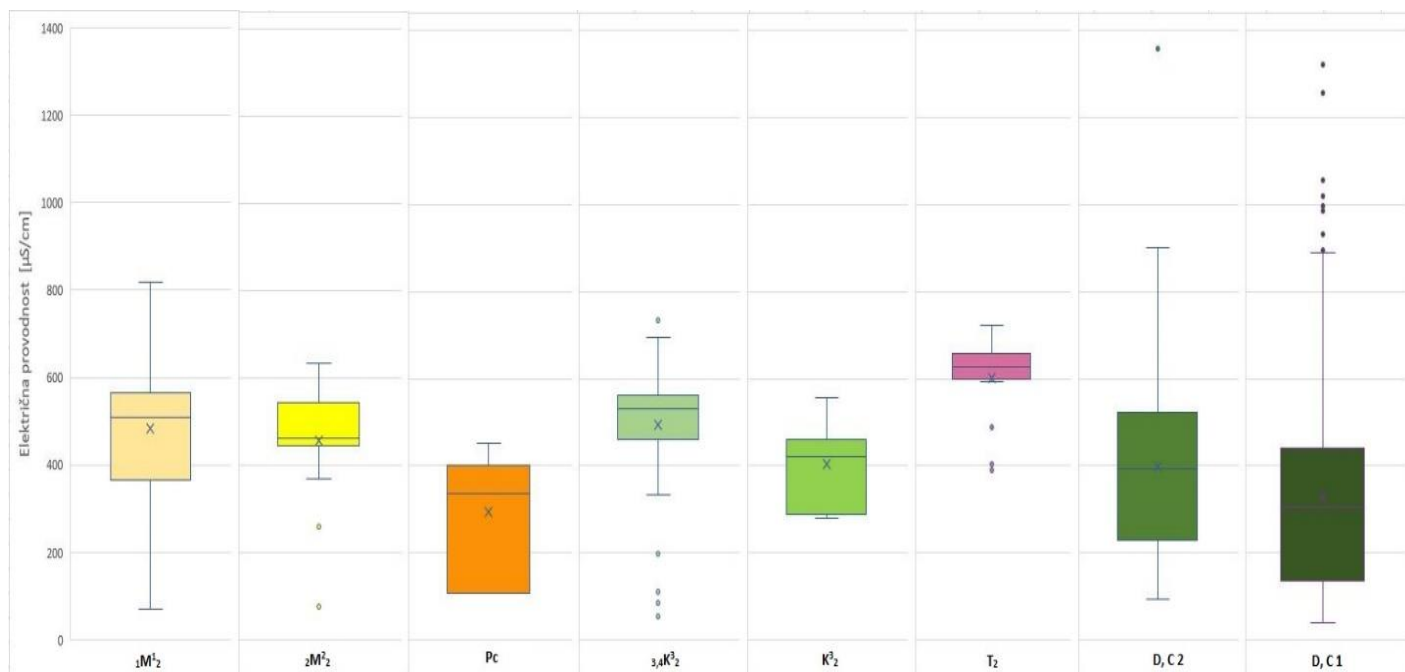
Na području litostratigrafske jedinice koju čine devonski i karbonski ortometamorfiti (D,C 2) mjerenja su pokazala vrlo veliki raspon. Minimalna izmjerena vrijednost EC bila je 93 $\mu\text{S/cm}$, a maksimalna vrlo visokih 1358 $\mu\text{S/cm}$ (Tab. 4.5.4.1; Sl. 4.5.4.3), s time da je ona označena kao iznimka u skupu čija je najveća vrijednost označena kao 910 $\mu\text{S/cm}$ (Sl. 4.5.4.1). Prosječna vrijednost iznosila je 397 $\mu\text{S/cm}$, a medijalna 392 $\mu\text{S/cm}$. Izmjerene vrijednosti pH na području iste litostratigrafske jedinice kreću se od minimalnih 6,27 do maksimalnih 8,67, s time da su obje te vrijednosti označene kao iznimke, pa je

raspon niza od 6.48 do 8.19 (Sl. 4.5.4.2). Prosječna vrijednost pH iznosi 7,49, a medijalna 7,57 (Tab. 4.5.4.1).

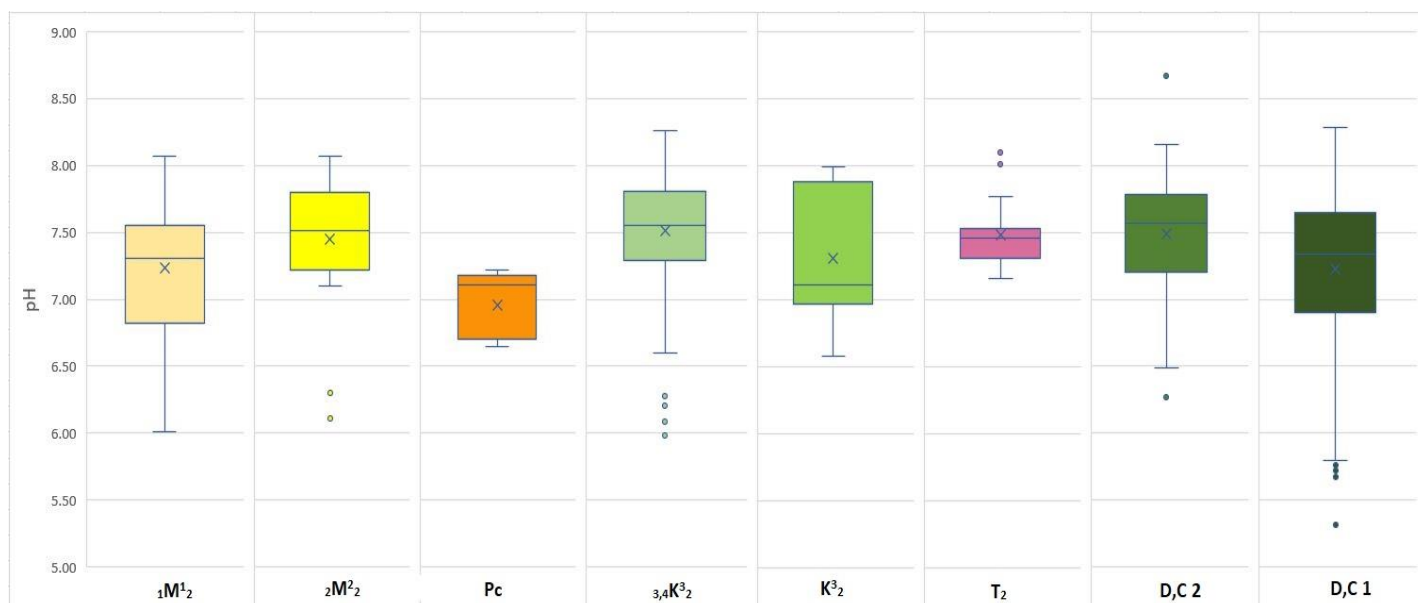
Na području devonskih i karbonskih parametamorfita (D,C 1) rezultati također pokazuju velik raspon vrijednosti (Sl. 5.4.4.3). Najmanja izmjerena vrijednost EC bila je 41 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a maksimalna 1322 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tab. 4.5.4.1). Međutim, najviših 8 izmjerenih vrijednosti označene su kao iznimke, te je kao najveća vrijednost skupa 890 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Sl. 4.5.4.1). Prosječna vrijednost iznosila je 331 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a medijalna 306 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Izmjerene vrijednosti pH na području iste litostratigrafske jedinice kreću se od minimalnih 5,32 do maksimalnih 8,28 (Sl. 4.5.4.2; Tab. 4.5.4.1). Dio niskih vrijednosti pH je označen kao iznimka, stoga je najniža vrijednost skupa 5,80. Prosječna vrijednost pH iznosi 7,23, a medijalna 7,34 (Tab. 4.5.4.1).

Tab. 4.5.4.1. Vrijednosti električne provodnosti (EC) i pH prema litostratigrafskim jedinicama

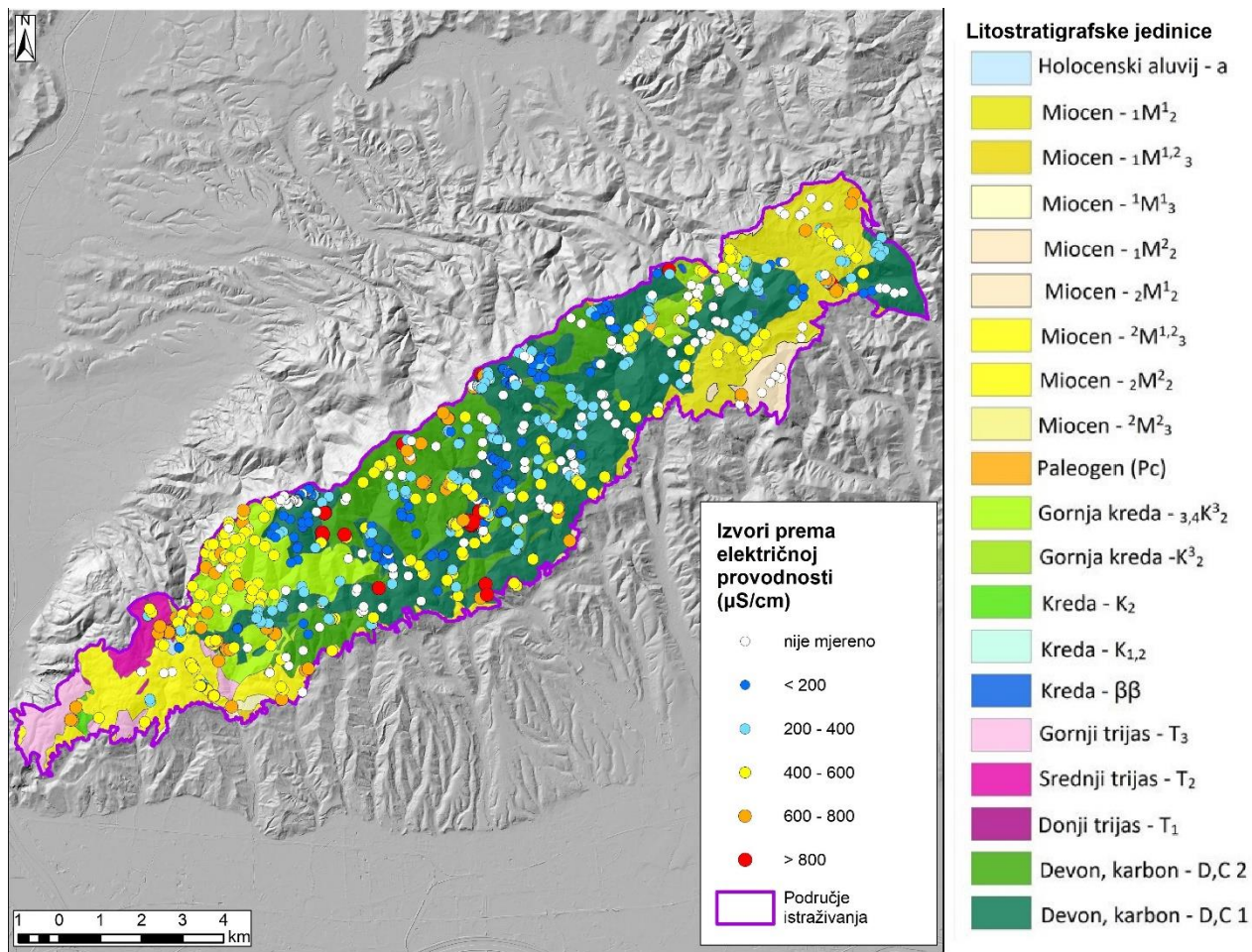
Oznaka	Starost	Vrste stijena	Broj mjenjenih izvora	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)				pH			
				Min	Max	Prosjek	Median	Min	Max	Prosjek	Median
$1M^1_2$	Miocen	Konglomerati, šljunci, pijesci	39	71	817	485	509	6,01	8,07	7,23	7,31
$2M^2_2$	Miocen	Vapnenci, lapori, pješčenjaci	31	78	635	458	464	6,11	8,07	7,45	7,51
Pc	Paleogen	Konglomerati, pješčenjaci, lapori i vapnenci	7	107	452	294	335	6,65	7,22	6,96	7,11
$3,4K^3_2$	Kreda (Gornja)	Breče, konglomerati, vapnenci	95	53	744	493	530	5,98	8,26	7,52	7,55
K^3_2	Kreda (Gornja)	Konglomerati, vapnenci, lapori	11	281	557	405	420	6,58	7,99	7,3	7,11
T_2	Trijas (Srednji)	Dolomiti, podređeno vapnenci	22	390	723	602	626	7,16	8,1	7,48	7,46
D, C 2	Devon, Karbon	Ortometamorfiti-škriljavci, gabri, dijabazi	120	93	1358	397	392	6,27	8,67	7,49	7,57
D, C 1	Devon, Karbon	Parametamorfiti-grauvake, siltiti, vapnenci, dolomiti	350	41	1322	331	306	5,32	8,28	7,23	7,34



Sl. 4.5.4.1. Rasponi izmjerenih vrijednosti električne provodnosti (EC) izvorske vode prema litostratigrafskim jedinicama



Sl. 4.5.4.2. Rasponi izmjerenih pH vrijednosti izvorske vode prema litostratigrafskim jedinicama



Sl. 4.5.4.3. Prostorni raspored izvora prema izmjerenoj električnoj provodnosti (EC)
Izvor: Podloga izrađena prema: Šikić i dr., 1977; Basch, 1981; Šikić, 1995

4.6. Klasifikacija izvora

Klasifikacija prema tipovima Steinmanna i Thienemanna

Osim klasifikacije prema Meinzerovim kategorijama izdašnosti opisane u poglavlju 4.2. provedena je i klasifikacija izvora na temelju podjele na osnovne tipove hidroloških oblika koje je uspostavio Bornhauser (1913), a dopunili Steinmann (1915) i Thienemann (1924). Dio autora naziva tu podjelu ekomorfološkom, a drugi hidrološkom i stanišnom. Riječ je o podjeli izvora na helokrene, reokrene i limnokrene. Helokreni izvori (grčki *helos* – močvara; *krene* – izvor) su oni čija voda difuzno izbija na površinu te često tvore veću ili manju blatnu, pa čak i močvarnu površinu na mjestu izbijanja vode. Reokreni izvori (grčki *rheo* – tok vode, potok; *krene* – izvor) su oni čija voda relativno koncentrirano izbija na površinu i odmah nastavlja teći koritom tvoreći tekućicu. Limnokreni izvori (grčki *limnos* –

jezero; *krene* – izvor) su oni koji na mjestu izbijanja vode na površinu tvore veće ili manje jezerce. Drugi autori s vremenom su razvijali i druge tipove izvora uključujući navedenu podjelu unutar svojih tipova. Primjer su tipovi koje su razvili Springer i Stevens (2009). Tri opisana tipa dio su njihove klasifikacije s 12 tipova izvora koja je namijenjena za globalnu upotrebu. Drugi autori (npr. Martin i Brunke, 2012) uz nabrojana osnovna tri tipa opisali su i hibridne tipove, koji su kombinacija, odnosno prijelazni tipovi. Tako su primjerice nastali reohelokreni i limnohelokreni tip izvora.

Tab. 4.6.1. Podjela izvora prema tipovima hidroloških oblika

Osnovni hidrološki tip	Broj izvora	Udio izvora u ukupnom broju (%)	Udio izvora od onih s određenim tipom (%)
Helokreni	350	38,89	51,24
Reokreni	302	33,56	44,22
Limnokreni	4	0,44	0,59
Kaptirani	27	3,00	3,95
Nepoznato (uključuje i ostalo)	217	24,11	/
Ukupno	900	100,00	100,00

Korištenjem terenski prikupljenih podataka kao što su način izbijanja vode na površinu, način otjecanja vode te prostorno okruženje razvijena je tipologija medvedničkih izvora na temelju ranije opisanih tipova hidroloških oblika. Izvori su prvo podijeljeni u osnovne skupine – reokreni, helokreni i limnokreni izvori, te je dodan još jedan tip – kaptirani izvori, za one izvore koji su značajno antropogeno modificirani, odnosno stvoren je neki oblik vodozahvata. Najviše izvora pripada helokrenom tipu, njih 350, odnosno 51,24 % od broja izvora kojem je određen tip. U reokreni tip svrstana su 302 izvora, odnosno njih 44,22 %. Samo 4 izvora su određena kao limnokrena (0,59 %) te je 27 izvora kaptirano (3,95 %). Za 217 izvora nije bilo moguće jasno odrediti tip (Tab. 4.6.1), ponajviše zbog njihove nedostupnosti uzrokovane gustom vegetacijom ili vrlo strmim nagibom padina.

Proširena tipologija izvora Medvednice

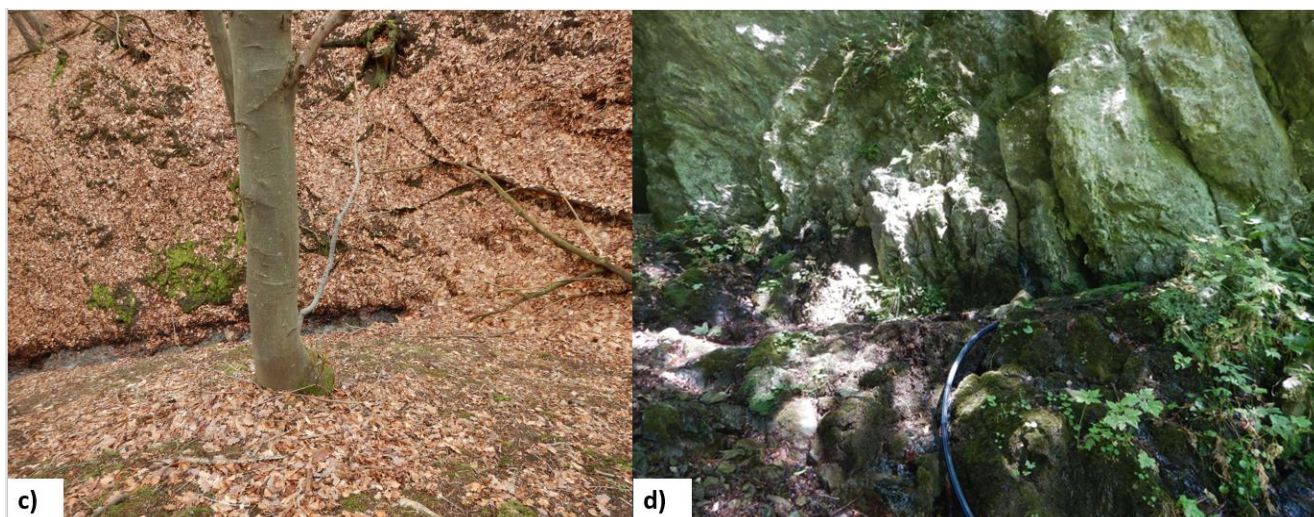
Na temelju osnovne podjele i terenski uočenih obilježja, razvijen je prijedlog specifičnih tipova izvora. Razlog za to bile su posebnosti izvora na Medvednici te veliki broj prijelaznih tipova izvora. Temeljna obilježja za razvoj novih tipova, osim osnovne podjele, bila su geomorfološka – vrsta okruženja i oblik u kojem nastaje izvor, hidrološka – način, odnosno mehanizam istjecanja vode te antropogeni utjecaj. Na temelju opažanja i uočenih sličnosti između izvora razvijeno je 7 hidrogeomorfoloških tipova izvora: helokreni, reokreni, limnokreni, stijenski, kombinirani/prijelazni tip, ostali (prirodni) izvori te antropogeno izmijenjeni izvori (Sl. 4.6.1; Sl. 4.6.2; Sl. 4.6.3). Osim već opisanih osnovnih tipova, pridodani tipovi su stijenski izvori, kod kojih voda izbija iz stijene i preljeva se preko nje, zatim kombinirani ili prijelazni izvori, koji imaju obilježja dvaju ili više osnovnih tipova. Antropogeno izmijenjeni izvori podrazumjevaju izvore čija voda je na jednostavniji (npr. cijev) ili tehnički složeniji način zahvaćena u svrhu ljudskog korištenja (npr. kaptirani izvori). Ostali tipovi podrazumjevaju prirodne izvore koji imaju posebnu ili jedinstvenu morfologiju i način otjecanja.

Tab. 4.6.2. Podjela izvora prema predloženim hidrogeomorfološkim tipovima

Oznaka tipa	Hidrogeomorfološki tip	Broj izvora	Udio izvora u ukupnom broju (%)	Udio izvora od onih s određenim tipom (%)
a	Limnokreni	2	0,22	0,29
b	Helokreni	273	30,33	39,85
c	Reokreni	151	16,78	22,04
d	Stijenski	14	1,56	2,04
e	Kombinirani/Prijelazni	181	20,11	26,42
f	Antropogeno izmijenjeni	45	5,00	6,57
g	Ostalo	19	2,11	2,77
n	Neodređeno	215	23,89	/
	Ukupno	900	100,00	100,00



Sl. 4.6.1. Primjer limnokrenog izvora (a) i helokrenog izvora (b)



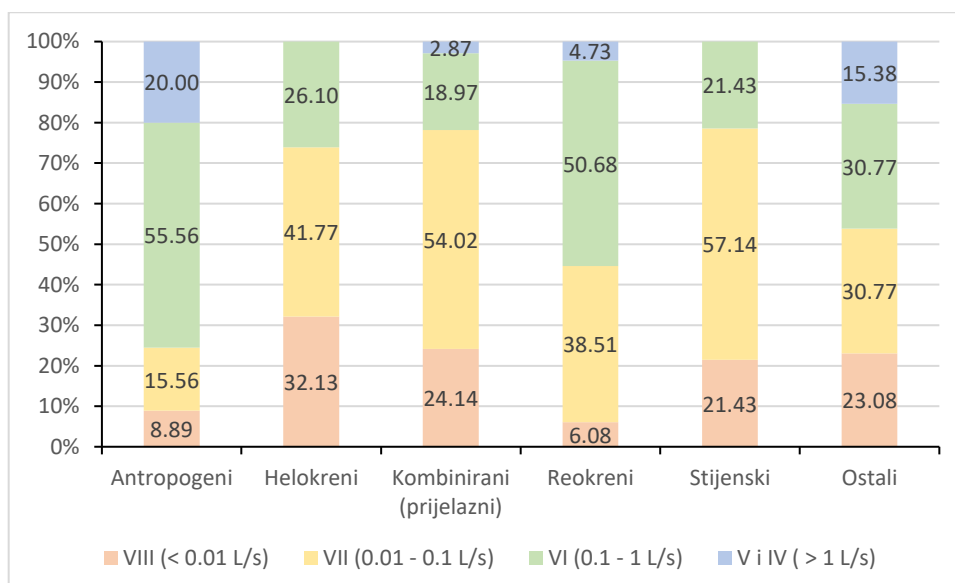
Sl. 4.6.2: Primjer reokrenog izvora (c) i stijenskog izvora (d)



Sl. 4.6.3: Primjer kombiniranog/prijelaznog izvora (e) i antropogeno izmijenjenog (kaptiranog) izvora (f)

U limnokrene izvore svrstana su dva izvora. Ostala dva izvora, koja su bila svrstana u limnokreni stranišni tip prema klasifikaciji Steinmanna i Thienemanna, svrstani su u prijelazne tipove. U helokrene izvore svrstano je 273 izvora, odnosno 39,85 % izvora s određenim tipom, što ih čini najzastupljenijom tipom izvora. U reokreni tip svrstan je 151 izvor (22,04 %). Stijenski tip izvora zastupljen je s 14 izvora, odnosno 2,04 % od izvora s određenim tipom. Kombinirani, odnosno prijelazni tip drugi je najzastupljeniji sa 181 izvorom, odnosno 26,42 %. Ostalih prirodnih izvora je 19 (2,77 %), a antropogeno izmjenjenih 45 (6,57 %). Za 215 izvora nije bilo moguće odrediti hidrogeomorfološki tip, ponajviše zbog njihove nedostupnosti (Tab. 4.6.2).

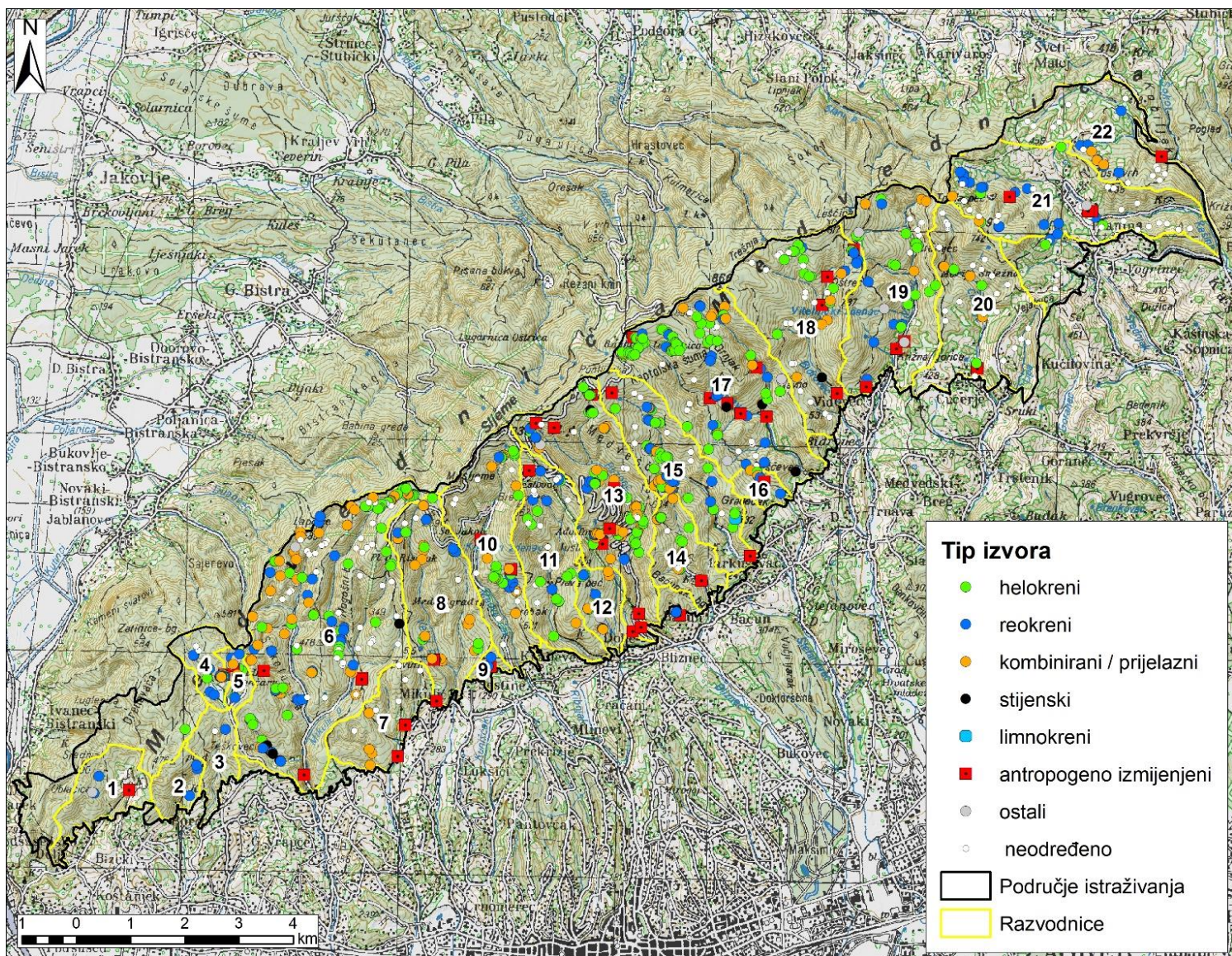
Razlike u hidrogeomorfološkim tipovima izvora proučene su s obzirom na njihove kategorije izdašnosti. Antropogeno utjecani izvori imaju najveći udio najizdašnijih izvora (kategorija IV i V, > 1 L/s), točno 20 % (Sl. 4.6.4). Druga najizdašnija kategorija čini 55,56 % antropogeno izmjenjenih izvora. Nadalje, 15,56 % antropogeno izmijenjenih izvora čine oni kategorije VII (0,01 – 0,1 L/s), a 8,89 % izvori kategorije VIII (< 0,01 L/s). U slučaju helokrenih izvora, kategorija izvora s izdašnošću većom od 1 L/s nema. Izvori kategorije VI čine 26,10 %, a izvori kategorije VII (0,01 – 0,1 L/s) su najzastupljeniji s 41,77 %. Izvori kategorije VIII čine 32,13 % helokrenih izvora. Više od polovice kombiniranih, odnosno prijelaznih tipova izvora čine oni kategorije VII (0,01 – 0,1 L/s), točnije 54,02 %. Izvori kategorije V čine 2,87 % prijelaznih izvora, a izvori kategorije VI 18,97 %. Ostatak čine izvori izvori najmanje izdašnosti, odnosno kategorije VIII s 24,14 %.



Sl. 4.6.4. Udio kategorija izdašnosti izvora prema hidrogeomorfološkim tipovima

U slučaju reokrenih izvora više od polovice čine izvori kategorije VI (0,1 – 1 L/s). Izvori kategorije V čine 4,73 % reokrenih izvora, dok izvori kategorije VII čine 38,51 % njih. Preostalih 6,08 % reokrenih izvora čine oni najmanje izdašnosti. Stijenski izvori su relativno malobrojni, a sastavljeni su većinom od izvora kategorije VII (57,14 %). 21,43 % stijenskih izvora čine oni kategorije izdašnosti VI (0,1 – 1 L/s), a 21,43 % izvori kategorije VIII (< 0,01 L/s). Nije zabilježen niti jedan stijenski izvor s izdašnošću većom od 1 L/s. Ostalih izvora je 14. Od njih, 2 izvora (15,38 %) je svrstano u kategoriju V. U kategoriju VI svrstano je 30,77 % njih, kao i u kategoriju VII (Sl. 4.6.4). Ostalih izvora najmanje izdašnosti je 23,08 %.

Prostorno gledano, većina antropogeno izmijenjenih izvora nalazi se uz rubna gradska područja ili uz prometnice. Helokreni izvori relativno su jednoliko raspoređeni po istraživanom području iako se može uočiti njihova veća koncentracija u središnjem dijelu, uz Sljemensku cestu, te u izvorišnom dijelu potoka Trnava, uz sami greben (Sl. 4.6.5). Kombinirani, odnosno prijelazni izvori također su raspoređeni cijelim istraživanim područjem, ali se može uočiti njihova veća koncentracija u gornjem dijelu toka potoka Vrapčak te u središnjem dijelu Blizneca, ispod Sljemenske ceste. Reokreni izvori raspoređeni su većinom pojedinačno, diljem cijelog istraživanog područja. Nešto veći njihov broj može se uočiti na (fluvio)krškom krajnjem jugoistočnom dijelu istraživanog područja, te na sjeveroistoku, u poriječju potoka Vukov dol. Preostali tipovi brojčano su nedovoljno zastupljeni da bi se govorilo o njihovoj prostornoj raspodjeli.



Sl. 4.6.5. Prostorni raspored hidrogeomorfoloških tipova izvora

Na karti brojkama su označena porječja potoka: 1 – Dolje; 2 – Dubravica; 3 – Mačkovec; 4 – Jezeranec; 5 – Javorščak; 6 – Vrapčak (i Mikulić); 7 – Kustošak; 8 – Črnomerec (Veliki i Mali potok); 9 – Kuniščak; 10 – Kraljevec; 11 – Pusti dol; 12 – Gračec; 13 – Bliznec; 14 – Bačun; 15 – Markuševac; 16 – Štefanovec; 17 – Trnava (Stari i Novi potok); 18 – Bidrovec; 19 – Vidovec; 20 – Čučerje; 21 – Vukov dol; 22 – Suhopot.

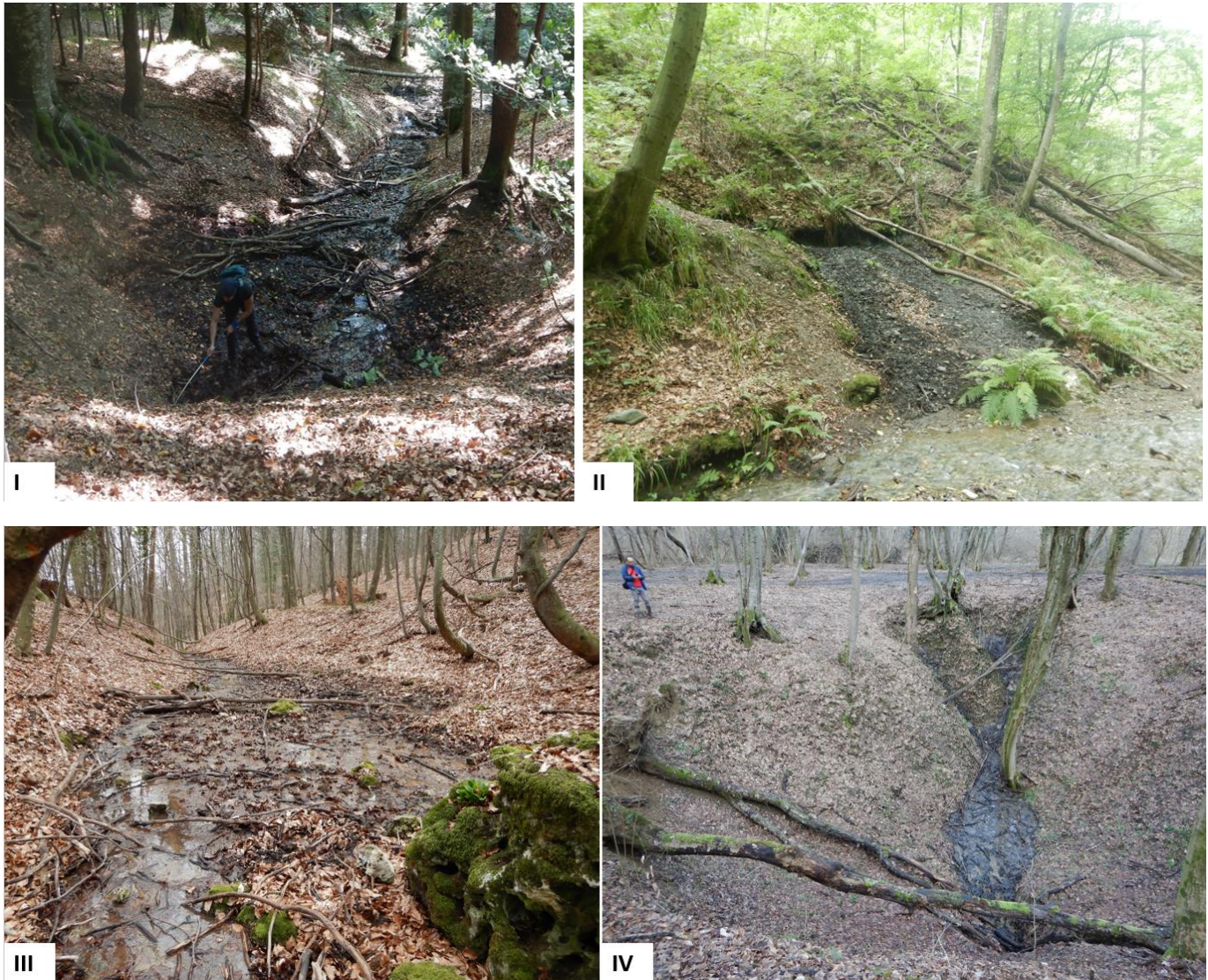
Podloga: Topografska karta mjerila 1:100 000 (DGU, 2024)

Tipovi izvora prema hidrografskom položaju

Osim prema tipovima definiranim od strane Steinmanna i Thienemanna, izvori su klasificirani prema položaju u odnosu na hidrografsku mrežu. Na temelju terenskih opažanja uočena je određena pravilnost u pojavljivanju izvora u odnosu na površinsku mrežu otjecanja. Prema tim opažanjima, izvori su svrstani u početne izvore, bočne izvore, izvore unutar korita te posebne izvore u ponikvama (Sl. 4.6.6). Početni izvori obično se nalaze na višim nadmorskim visinama te je nakon njih formirano korito u kojem voda otječe prema potočnim dolinama. Najčešće imaju izraženi izvorišni obluk, a rjeđe izviru unutar gornjeg dijela jaruge sa slabije izraženim oblukom. To je najbrojniji tip izvora prema ovoj podjeli s udjelom od 70 %, odnosno 630 izvora. Bočni izvori nalaze se na stranama (obalama) jaruga i potočnih dolina, na tek nešto višoj razini od dna korita. Voda iz njih najčešće otječe relativno okomito na glavni smjer tečenja unutar doline ili korita na čijoj obali se nalaze. U pravilu imaju slabije izraženi izvorišni obluk i nalaze se do maksimalno desetak metara udaljeni od glavnog korita jaruge ili doline, obično bez razvijenog vlastitog korita. Najčešće su nastali usjecanjem jaruge ili doline čime je presječena razina temeljnice. Često se zbog nestabilnosti obale uz njih javljaju i padinski procesi. U ovom istraživanju zabilježeno je 209 bočnih izvora, odnosno 23,22 % od ukupnog broja. Izvori u koritu nastaju unutar korita potoka (rjeđe jaruga) te se za razliku od bočnih izvora nalaze u razini korita, obično uz obale. Vezani su pетеžno za niže nadmorske visine. Takvih izvora zabilježeno je 58, odnosno 6,44 %. Poseban tip čine izvori u ponikvama, kojih je u ovom istraživanju zabilježeno tek 3.

Tab. 4.6.4. Broj i udio izvora prema položajnom tipu

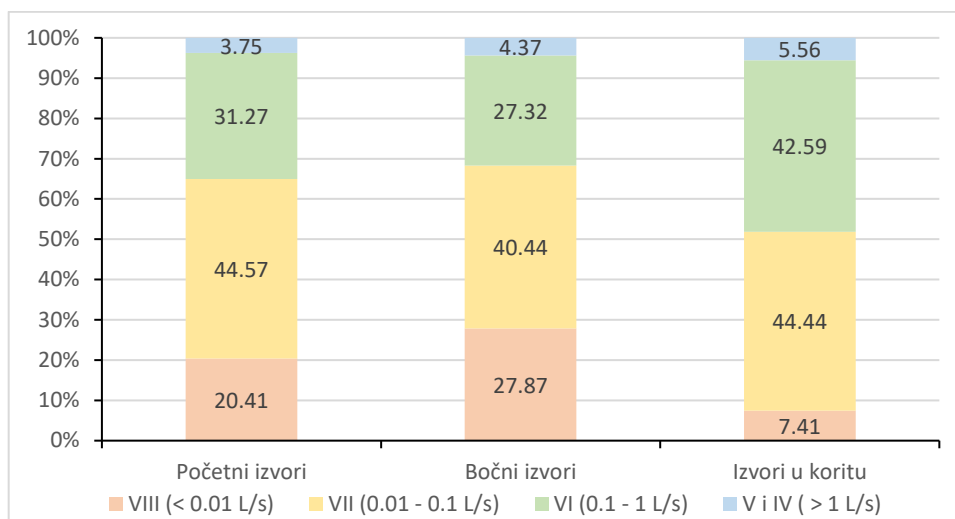
Položajni tip	Broj izvora	Udio izvora (%)
Početni izvori	630	70,00
Bočni izvori	209	23,22
Izvori u koritu	58	6,44
Izvori u ponikvi	3	0,33
Ukupno	900	100



Sl. 4.6.6. Primjeri tipova izvora prema hidrografskom položaju: početni izvor (I), bočni izvor (II), izvor u koritu (III), izvor u ponikvi (IV).

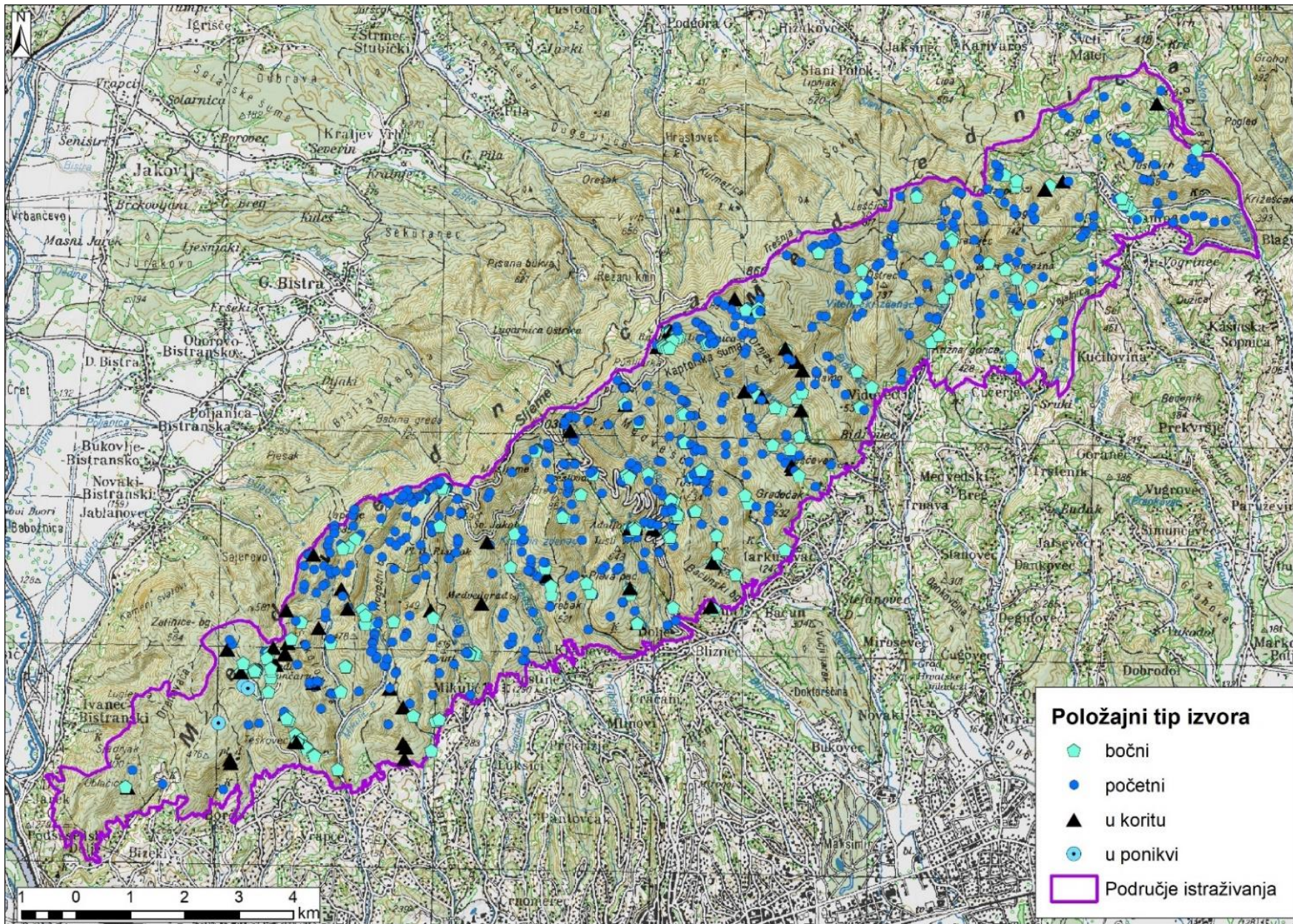
Tipovi izvora prema položaju analizirani su prema udjelima kategorija izdašnosti izvora, kako bi se uvidjelo postoje li razlike u hidrološkim obilježjima izvora s obzirom na njihov terenski položaj. Početni izvori sastavljeni su 3,75 % od izvora kategorije V (> 1 L/s) te 31,27 % od izvora kategorije VI (0,1 – 1 L/s). Izvori kategorije VII (0,01 – 0,1 L/s) čine većinu početnih izvora s udjelom od 44,57 %, a izvori najslabije izdašnosti, oni kategorije VIII ($< 0,01$ L/s) čine 20,41 % početnih izvora (Sl. 4.6.7). Bočni izvori imaju sličan udio kategorija. Izvori kategorije V čine 4,37 %, a izvori kategorije VI 27,32 %. Izvori kategorije VII i ovdje su najzastupljeniji te čine 40,44 % bočnih izvora. Izvori kategorije VIII čine preostalih 27,87 % bočnih izvora. U slučaju izvora u koritu primjetan je veći udio izdašnijih klasa izvora. Izvori kategorije V čine 5,56 % izvora u okritu, a izvori kategorije VI 42,59

% njih. Izvori kategorije VII i ovdje su najzastupljeniji s 44,44 %, dok preostalih 7,41 % izvora u koritu čine oni s najmanjom izdašnošću (Sl. 4.6.7).



Sl. 4.6.7. Udio kategorija izdašnosti izvora prema položajnim tipovima izvora

Prostorni raspored izvora prema položajnom tipu ukazuje na veći broj izvora u koritu na jugozapadnom dijelu istraživog područja (Sl. 4.6.8), iako su zastupljeni pojedinačno i u drugim dijelovima. Bočni izvori i početni izvori jednoliko su raspoređeni po cijelom istraživom području. Sukladno opisu tipova i prethodno analiziranim obilježjima, početni izvori koncentriraniji su na višim nadmorskim visinama. Bočni izvori više se nalaze u nižim dijelovima potočnih dolina, ali je primjetna i njihova veća koncentracija na jugozapadnom, fluviokršskom dijelu istraživog područja. Ondje se također nalaze i tri izvora u ponikvama (Sl. 4.6.8).



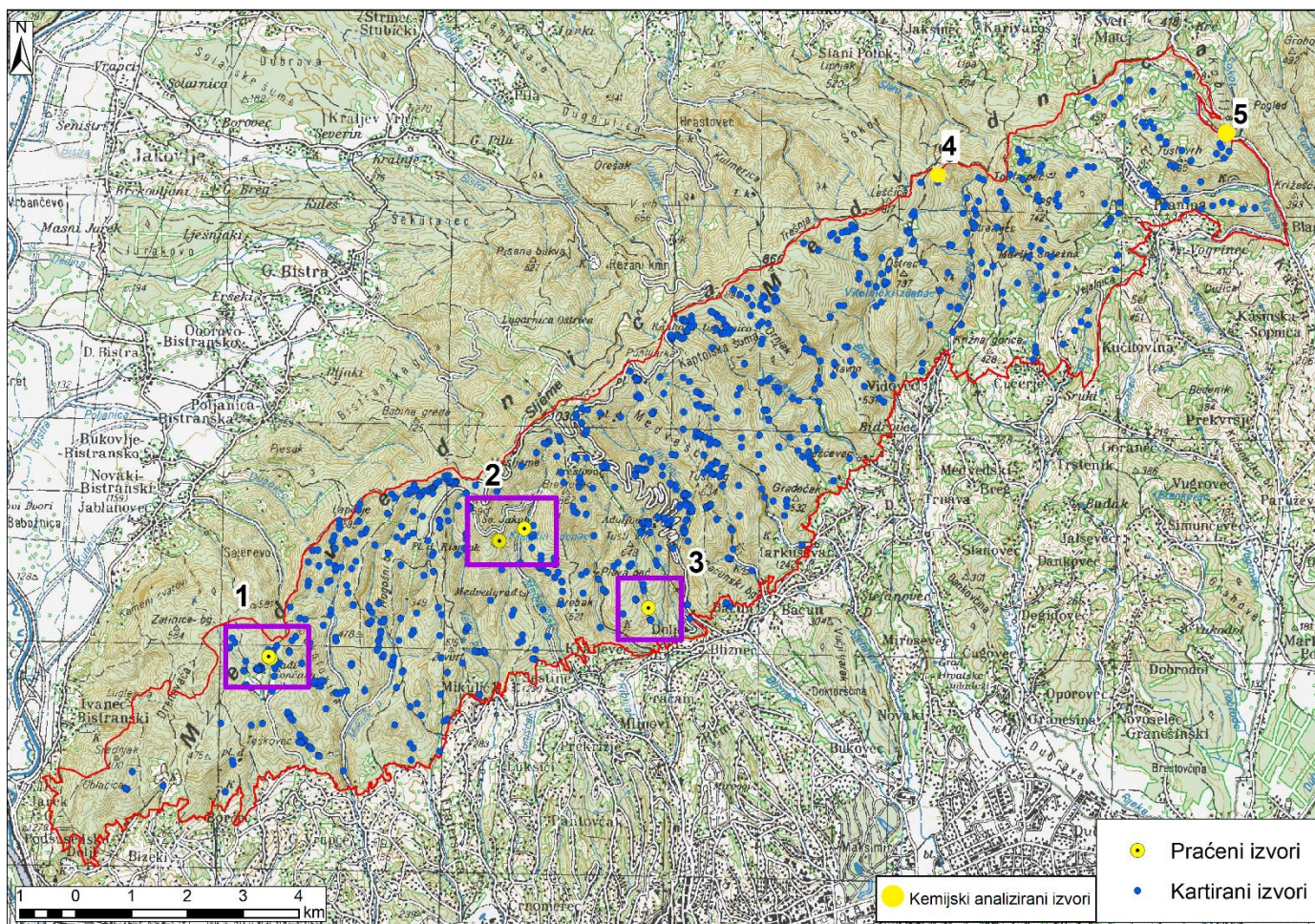
Sl. 4.6.8. Prostorni raspored izvora prema položajnom tipu
 Podloga: Topografska karta mjerila 1:100 000 (DGU, 2024)

4.7. Praćenje izvora

Praćenje obilježja provedeno je na 6 odabranih izvora (Sl. 4.7.1). Radi se o izvorima Jambrišakovo vrelo i njemu susjednom izvoru Mali Jambrišak u blizini Ponikava, na jugozapadu istraživanog područja. Praćenje je provedeno i na dvama izvorima Malog potoka (potok Črnomerec), koji su za potrebe istraživanja nazvani Mali i Mini, dok se na topografskoj karti spominje hidronim Mrzlak (Mlečno vrelo). Njima u blizini nalazi se Kraljičin zdenac, kaptirani izvor koji pripada poriječju potoka Kraljevec. Posljednji izvor je jedan od izvora potoka Gračec, nazvan Karlov izvor zbog toga što ga je zapazio kolega Karlo Vinković tijekom terenskog obilaska tog dijela. Izvor nije obilježen niti na jednoj dostupnoj karti, niti imenom, niti oznakom a radi se o stalnom izvoru.

Praćenje je provedeno kroz 46 terenskih obilazaka u razdoblju od početka ožujka 2022. do kraja veljače 2024. Na Jambrišakovom vrelu i Karlovom izvoru postavljeni su mjerni uređaji (*data loggeri*) za praćenje vodostaja, temperature i EC. Nažalost, dio mjernih uređaja je bio povremeno uklanjan iz izvora od nepoznatih osoba te je dio uređaja i nestao. Zbog toga je samo na izvoru Jambrišakovo vrelo uspostavljeno trajno mjerenje navedenih obilježja, i to u razdoblju od studenog 2022. do kraja veljače 2024. Na Karlovom izvoru, osim zbog nestanka uređaja, praćenje nije bilo povoljno zbog prirodne promjene vodostaja uzrokovanog promjenama u koritu, kao što je stvaranje prirodnih brana. Zbog navedenog, promjene u vodostaju nisu pratile promjene u protoku te nije bilo moguće izraditi krivulju protoka.

Analiza kationa i aniona te karbonata u vodi provedena je na praćenim izvorima te na izvorima nazvanim Slani i Kašina (Sl. 4.7.1).

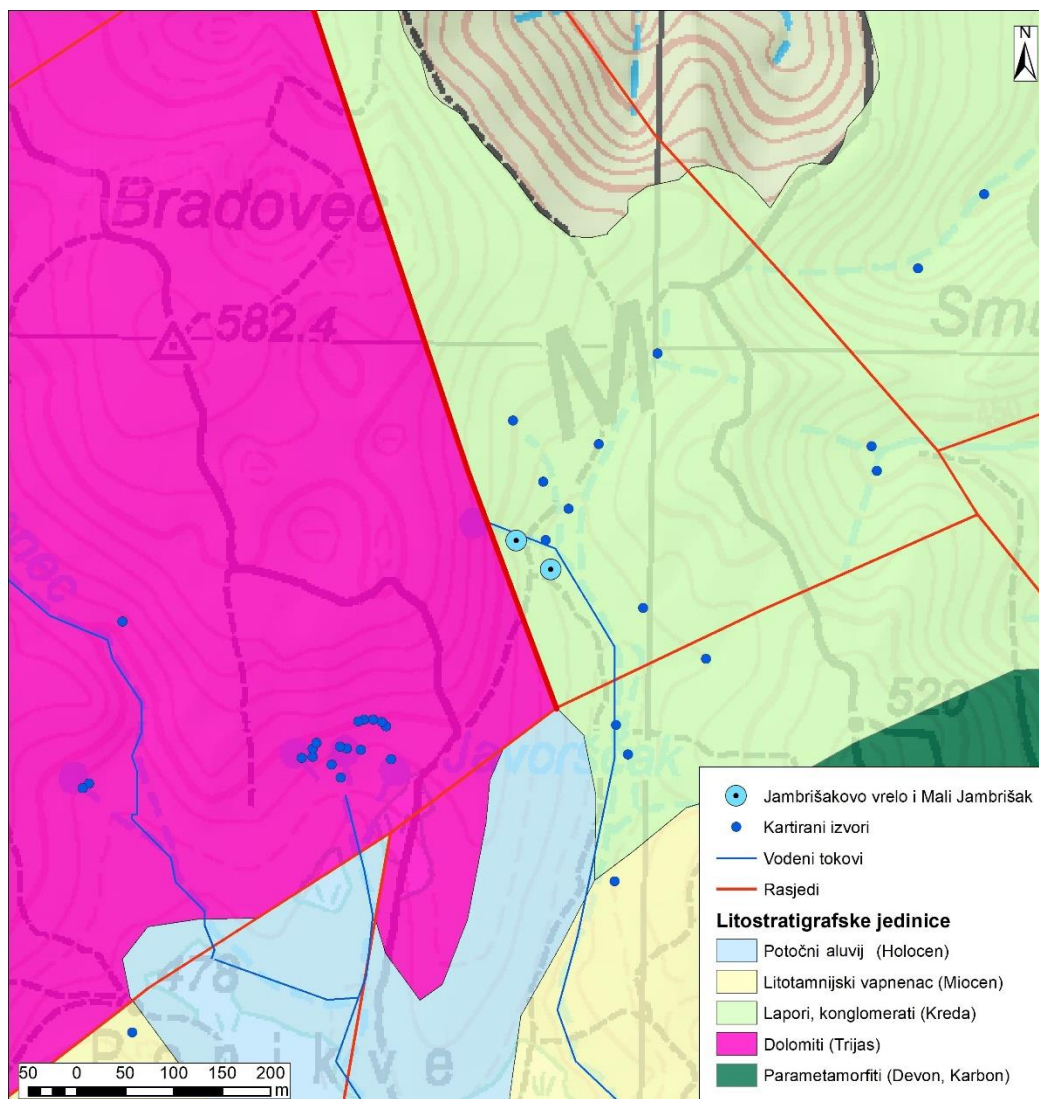


Sl. 4.7.1. Lokacije praćenih i kemijski analiziranih izvora (1 - Jambrišakovo vrelo i Mali Jambrišak; 2 - izvori Malog potoka (potok Črnomerec) i Kraljičin zdenac; 3 – Karlov izvor (Gračec); 4 – Slani izvor; 5 – izvor Kašina)

4.7.1. Opća geomorfološka i geološka obilježja praćenih izvora

Izvori Jambrišakovo vrelo i Mali Jambrišak

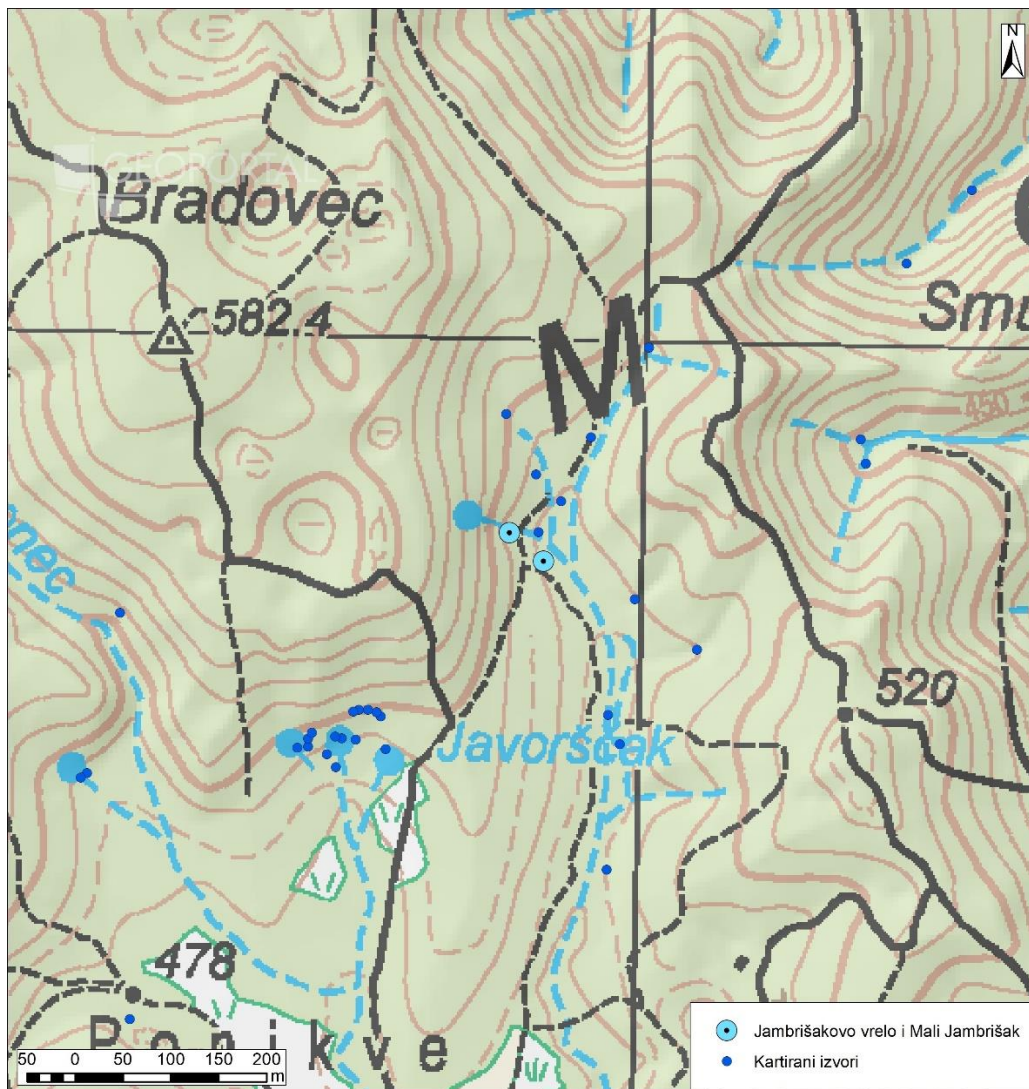
Izvori Jambrišakovo vrelo i Mali Jambrišak nalaze se na jugozapadnom dijelu istraživanog područja, u blizini livade Ponikve koja u geomorfološkom smislu predstavlja malo polje u kršu (Buzjak, 2001). To su izvori potoka Javorščaka, ponornice koja u blizini livade Ponikve ponire u podzemlje i teče prema sustavu spilje Veternice (Božićević, 1976; Buzjak, 2018). Prema opisanom jasno je da se radi o krškom području. Oba izvora nalaze se na području rasjednog kontakta trijaskih karbonata i krednih konglomerata, breča i lapora. Na terenu je vidljivo kako su prisutne i naslage holocenskog potočnog aluvija (Sl. 4.7.1.1).



Sl. 4.7.1.1. Položaj Jambrišakovog vrela i izvora Mali Jambrišak prema geološkim obilježjima prostora

Izvor: OGK 1:100 000 (Šikić i dr., 1977); Podloga: Topografska karta 1:25 000 (DGU, 2024)

Izvor Jambrišakovo vrelo nalazi se na nadmorskoj visini od oko 484 metra, a izvor Mali Jambrišak na oko 480 metara (Sl. 4.7.1.2). Jambrišakovo vrelo je krški, točnije spiljski izvor. Duljina spilje je oko 6,5 metara (Buzjak, 2001). Međutim, nakon samog izlaska iz podzemlja, voda teče usporeno unutar ujezerenja dimenzija oko 1,5 x 0,5 m, te dubine od nekoliko desetaka centimetara, ovisno o hidrološim uvjetima. Ujezerenje je djelomično nastalo i ljudskom intervencijom, a na njegovom kraju nalazi se korito (polucijev) niz koju otječe većina vode (Sl. 4.7.1.3). Zbog navedene morfološke kompleksnosti, Jambrišakovo vrelo svrstano je u ostali tip izvora prema predloženoj hidrogeomorfološkoj klasifikaciji.



Sl. 4.7.1.2. Smještaj Jambršakovog vrela i izvora Mali Jambršak
 Podloga: Topografska karta 1:25 000 (DGU, 2024)

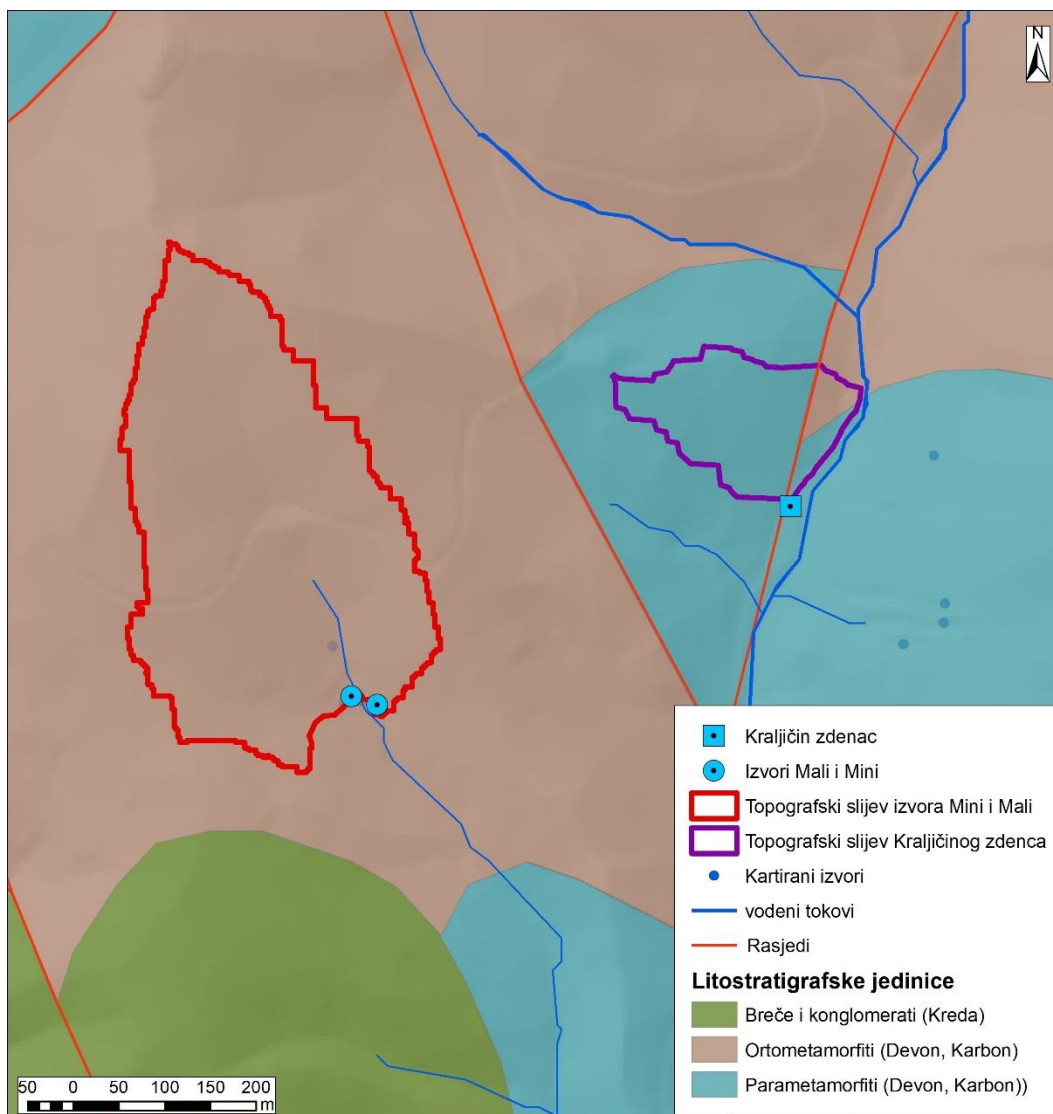


Sl. 4.7.1.3. Jambrišakovo vrelo (lijevo) i izvor Mali Jambrišak (desno)

Izvor Mali Jambrišak nalazi se tridesetak metara jugoistočno, na nekoliko metara nižoj nadmorskoj visini. Riječ je o uređenom izvoru obloženom kamenjem iz kojeg izlazi cijev kroz koju teče voda (Sl. 8.4.1.3). Zbog antropogenog utjecaja svrstan je u antropogeno modificirani tip izvora prema hidrogeomorfološkoj klasifikaciji. Bez ljudskih izmjena vjerojatno bi bio ogledni tip rekrenog izvora.

Izvori Malog potoka (potok Črnomerec) i Kraljičin Zdenac

Kraljičin zdenac te izvori Malog potoka pod nazivom Mali i Mini nalaze se u središnjem dijelu istraživanog područja, oko 2 km sjeverno od utvrde Medvedgrad. Kraljičin zdenac pripada poriječju potoka Kraljevec. Izvori Mali i Mini su početni izvori Malog potoka, koji je uz Veliki potok glavni izvorišni krak potoka Črnomerec. Kraljičin zdenac nalazi se na rasjedu pružanja sjeveroistok-jugozapad na području parametamorfnihi stijena (pretežno škriljevci) devonske i karbonske starosti. Izvori Malog potoka smješteni su na području ortometamorfnihi stijena devonske i karbonske starosti (Sl. 4.7.1.4).

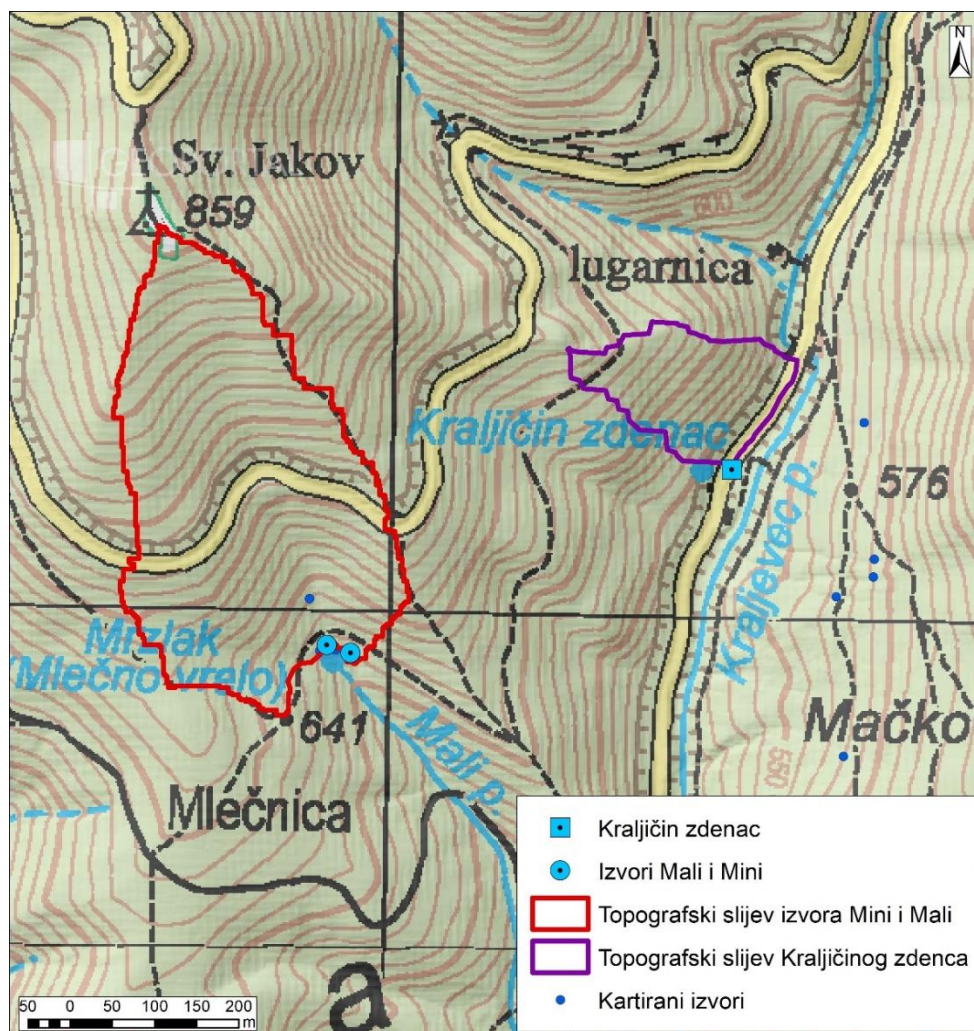


Sl. 4.7.1.4. Položaj Jambrišakovog vrela i izvora Mali Jambrišak prema geološkim obilježjima prostora

Izvor: OGK 1: 100 000 (Šikić i dr., 1977.)

Kraljičin zdenac nalazi se na visini od 530 metara nad morem ispod prometnice Prilaz Kraljičinom zdencu (Sl. 8.4.1.5). Izvor je uređen (kaptiran) još krajem 19. stoljeća, čemu svjedoči i natpis na ploči na samom izvoru. Voda, ovisno o hidrološkim uvjetima, istječe kroz jednu ili više rupa u zidu kaptaze (Sl. 8.4.1.6). Sukladno tome izvor je prema hidrogeomorfološkoj klasifikaciji svrstan u antropogeno izmijenjene izvore. Površina topografskog slijevnog područja Kraljičinog zdencu dobivenog obradom digitalnog modela reljefa GIS alatima iznosi 27 456 m².

Izvori Malog potoka nalaze se na području koje je na topografskoj karti mjerila 1:25 000 (DGU, 2024) označeno kao izvor Mrzlak/Mlečno vrelo (Sl. 4.7.1.5). Izvor Mali nalazi se odmah podno planinarske staze koja vodi prema planinarskom domu Grafičar i nalazi se na nadmorskoj visini od 618 metara. Izvor Mini nalazi se tridesetak metara istočnije, na nadmorskoj visini od 611 metara (Sl. 4.7.1.5). Oba izvora su reokrenog tipa s relativno malim, ali izraženim izvorišnim oblucima (Sl. 4.7.1.7). U slučaju izvora Mali voda izbija koncentrirano kroz otvor, dok u slučaju izvora Mini voda izbija difuzno, ali na manjem prostoru te voda odmah koncentrirano nastavlja teći koritom. Zajednička topografska slijevna površina izvora Mali i Mini iznosi 126 771 m².



Sl. 4.7.1.5. Smještaj izvora Mali i Mini te Kraljičinog zdenca i njihove topografske slijevne površine

Podloga: Topografska karta 1:25 000 (DGU, 2024)



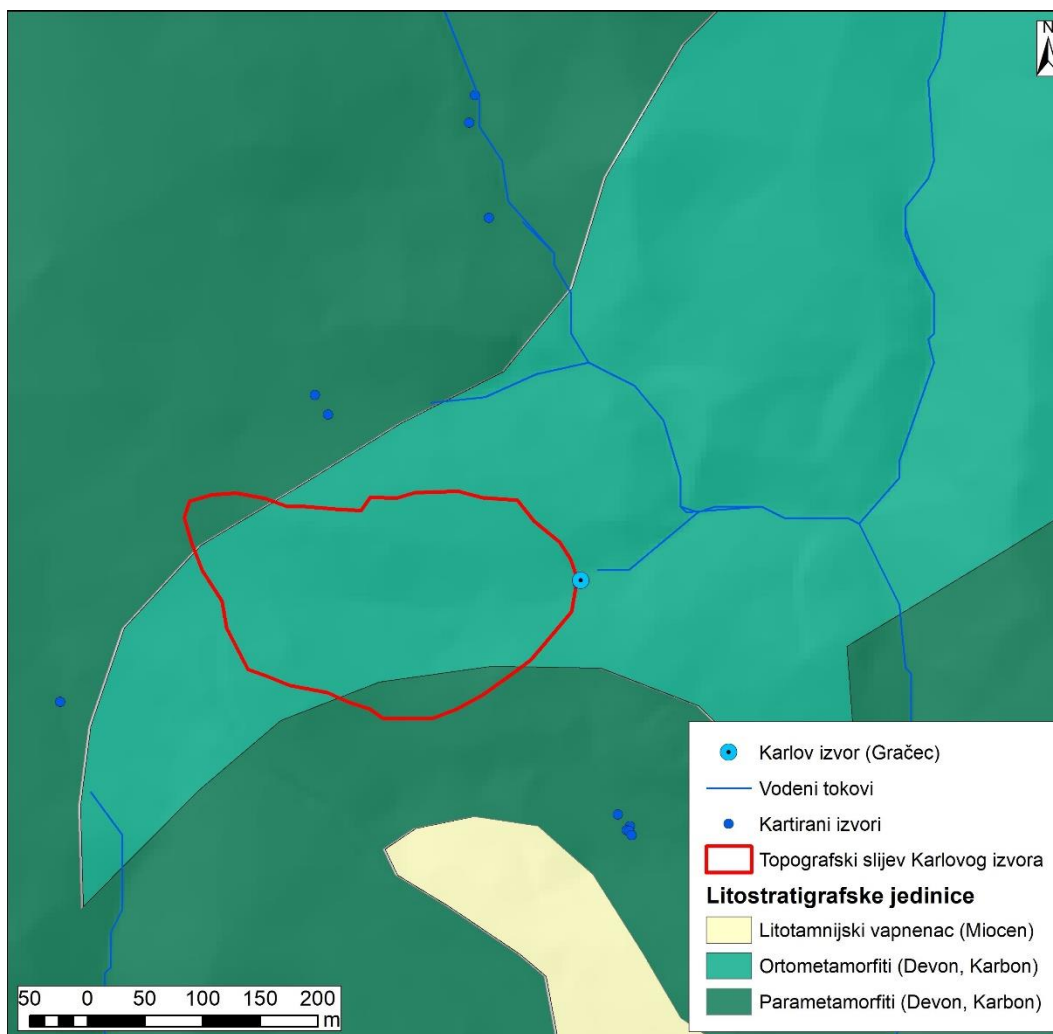
Sl. 4.7.1.6. Kraljičin zdenac



Sl. 4.7.1.7. Izvor Mali (gore) i Mini (dolje)

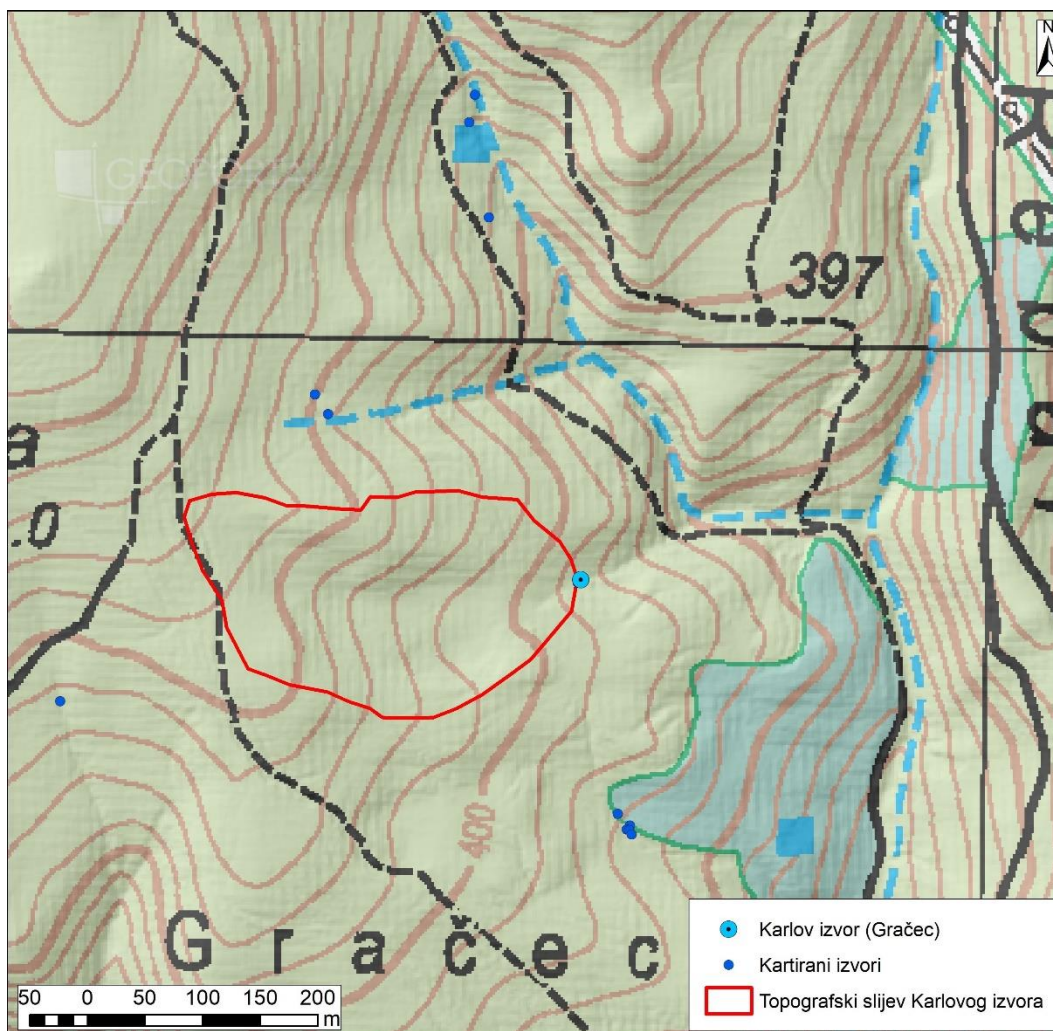
Karlov izvor (Gračec)

Karlov izvor, jedan od izvora potoka Gračec u središnjem djelu Medvednice nalazi se na prostoru građenom od devonskih i karbonskih ortometamorfiti (Sl. 4.7.1.8) te nije antropogeno izmijenjen. Nalazi se na 385 metara nadmorske visine i svrstan je u ostale izvore prema predloženim hidrogeomorfološkim tipovima (Sl. 4.7.1.9). Razlog za to je njegov poseban mehanizam izbijanja vode na površinu. Voda uzlazno izbija u prostor malenog jezera dubine oko 40 cm tvoreći dojam kao da vrije (vrelo). Takav tip izvora Bryan (1919) je nazvao kipteći izvor (*boiling spring*), iako voda zapravo ne ključa. Jezerce se nalazi u izvorišnom obluku te voda iz jezera oteče dalje koritom (Sl. 4.7.1.10). Topografsko slijevno područje Karlovog izvora veličine je 44 342 m².



Sl. 4.7.1.8. Položaj Karlovog izvora prema geološkim obilježjima prostora

Izvor: geološki podaci prema Šikić i dr., 1977



Sl. 4.7.1.9. Smještaj Karlovog izvora i njegovo topografsko slijevno područje
 Izvor: podloga Topografska karta mjerila 1:25 000 (DGU, 2024)



Sl. 4.7.1.10. Karlov izvor (Gračec)

4.7.2. Hidrološka obilježja praćenih izvora

Hidrološko praćenje sastojalo se od redovitih mjerenja protoka volumetrijskom metodom ili u slučaju Jambrišakovog vrela stalnog posrednog mjerenja protoka pomoću mjernih uređaja za mjerenje vodostaja i konstrukcije krivulje protoka. Osim toga, sustavno su mjereni fizikalno-kemijski parametri. Treba napomenuti kako je utvrđeno da su svi promatrani izvori stalni, odnosno da niti jedan od njih nije bio suh u promatranom dvogodišnjem razdoblju. Podaci o padalinama i temperaturi zraka s meteoroloških postaja Puntijarka (991 m.n.m.) i Zagreb Maksimir (123 m.n.m) korišteni su prilikom vizualizacije i analiza. Zbog nadmorskih visina praćenih izvora, koji su u rasponu od 384 m do 618 m nad morem, korištena je metoda interpolacije aritmetičkom sredinom (Chow i dr., 1988), tako da se koristila srednja vrijednost padalina i temperature zraka između te dvije postaje.

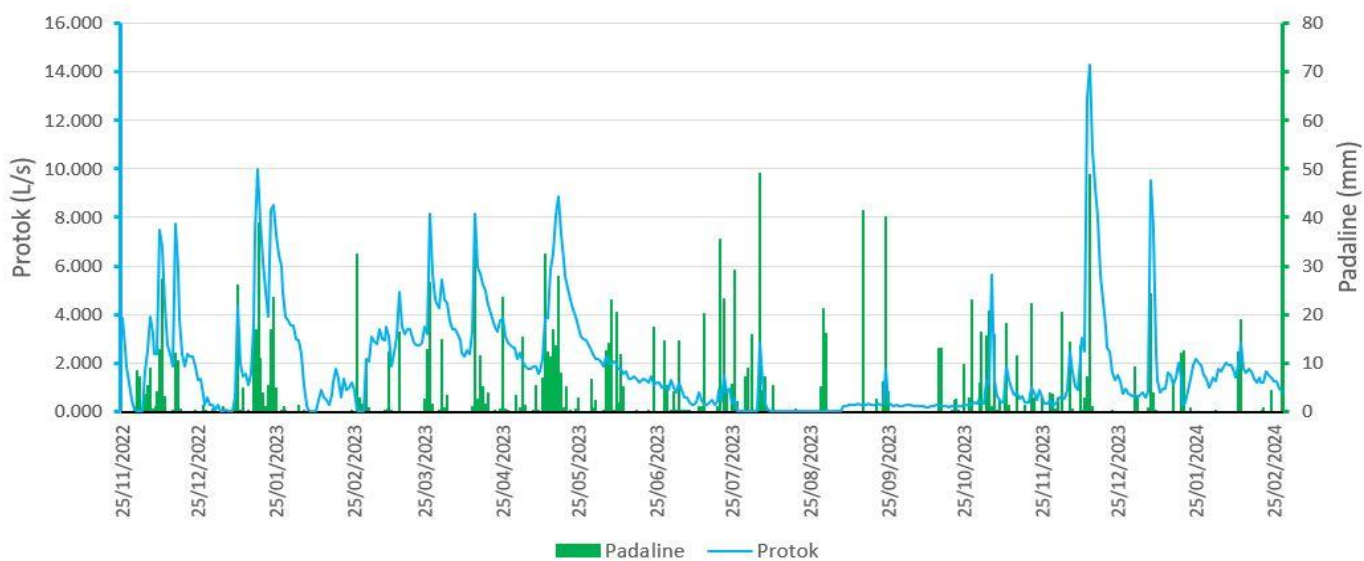
Hidrološka obilježja Jambrišakovog vrela i izvora Mali Jambrišak

Izdašnost, odnosno protok na izvorima Jambrišakovo vrelo i Mali Jambrišak praćeni su volumetrijskim mjerenjima. Ukupno je protok na Jambrišakovom vrelu mjeren 46 puta, a na Malom

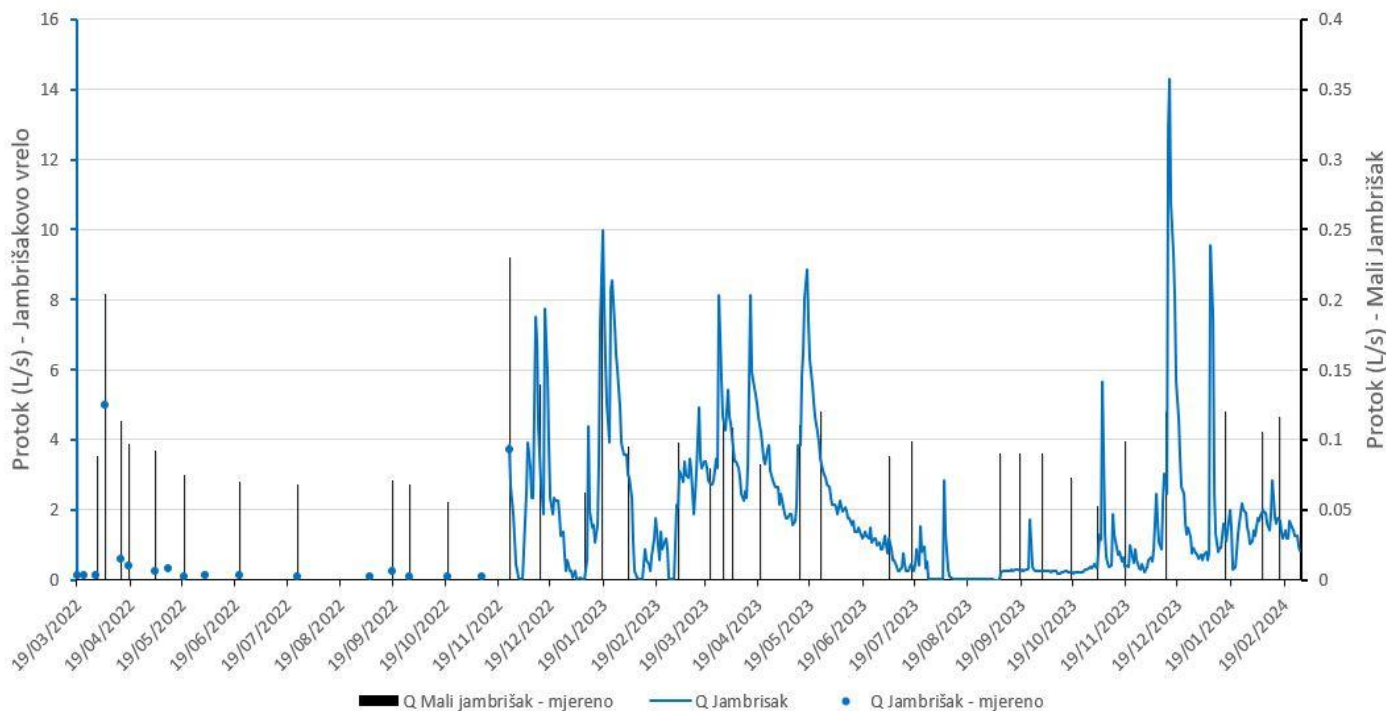
Jambrišaku 39 puta u razdoblju od dvije godine praćenja. Automatski mjerni uređaj u Jambrišakovom vrelu bilježio je vodostaj svakih 15 minuta. Međutim, zbog relativno male promjene u vodostajima i tehničkih ograničenja za potrebe ovog istraživanja izračunate su srednje dnevne vrijednosti vodostaja. Uz pomoć terenski mjerenih protoka (izdašnosti) i podataka s mjernog uređaja izrađena je protočna krivulja (krivulja protoka). Ta krivulja prikazuje odnos između vodostaja i protoka te pruža mogućnost relativno precizne procjene protoka na temelju vrijednosti vodostaja (Žugaj, 2000). Krivulja je korigirana prilikom svakog preuzimanja podataka o vodostaju s mjernog uređaja i ponovnog postavljanja. Posljedica je to specifičnih uvjeta u kojima uređaj nije svaki put postavljan u identičnom položaju, a zbog relativno niskog vodostaja (10-ak cm) i malih amplituda vodostaja, svaka manja promjena kod položaja uređaja značila bi i drugačije zabilježene vrijednosti vodostaja što bi utjecalo na formulu krivulje. Zbog toga je za svaki period između preuzimanja podataka izrađena posebna krivulja protoka.

Najmanji izmjereni protok na Jambrišakovom vrelu volumetrijskom metodom iznosio je 0,069 L/s, a izmjeren je 26. rujna 2022. Najveći protok izmjeren istom metodom iznosio je oko 13 L/s (nije bilo moguće precizno mjeriti zbog količine vode), a izmjeren je 18. siječnja 2023. Na temelju protočne krivulje i podataka s mjernog uređaja, najmanji dnevni protok na Jambrišakovom vrelu u promatranom razdoblju bio je 5. rujna 2023. i iznosio je 0,0013 L/s. Najveći dnevni protok mjernim uređajem je zabilježen 14. prosinca 2022. i iznosi 14,23 L/s (Sl. 4.7.2.1). Međutim, te rezultate treba uzeti s oprezom budući da su procijenjeni preko protočne krivulje. Prosječni protok Jambrišakovog vrela u promatranom dvogodišnjem razdoblju na temelju aritmetičke sredine volumetrijskih mjerenja iznosi 1.684 L/s. Na temelju podataka dobivenih iz krivulje protoka u razdoblju od studenog 2022. do veljače 2024., srednja vrijednost iznosi 1,868 L/s. Prema tome izvor pripada kategoriji izdašnosti V (1 – 10 L/s) prema Meinzeru (1923). Reakcija izvora na padaline je relativno brza. To nam pokazuje nagli rast protoka koji doseže svoj vrhunac već isti dan ili dan nakon oborina. Intenzitet reakcije protoka na padaline puno je manji u ljetnim mjesecima, barem u promatranom razdoblju (Sl. 4.7.2.1).

U slučaju Malog Jambrišaka, najveća izmjerena vrijednost protoka bila je 0,23 L/s, izmjerena 25. studenog 2022. Najmanja izmjerena vrijednost protoka bila je 28. rujna 2022. i iznosila je 0,068 L/s. Prosječni protok za dvogodišnje razdoblje iznosi 0,102 L/s. Prema čemu on pripada kategoriji izdašnosti VI (0,1 – 1 L/s) prema Meinzeru (1923).



Sl. 4.7.2.1. Prikaz protoka Jambrišakovog vrela i dnevnih količina padalina od studenog 2022. do veljače 2024.



Sl. 4.7.2.2. Mjereni protoci Jambrišaka i Malog Jambrišaka u razdoblju od ožujka 2022. do veljače 2024.

Iz opisanih protoka vidljivo je kako je Jambrišakovo vrelo izdašniji izvor od Malog Jambrišaka te da Mali Jambrišak ima puno manju varijaciju protoka (Sl. 4.7.2.2). Općenito, Jambrišakovo vrelo jedan je od najizdašnijih nekaptiranih izvora na istraživanom području. Osim što su različite

izdašnosti, već se iz minimalnih i maksimalnih vrijednosti protoka može primijetiti kako su ova dva izvora različitih varijabilnosti protoka. Varijabilnost protoka izračunata je prema Meinzerovoj metodi (1923) te prema Netopilovoj (1971). Prema Meinzeru, varijabilnost izvora (V) izražava se u postotku (Tab. 4.7.2.1) te je rezultat omjera razlike najvećeg (Q_{max}) i najmanjeg protoka (Q_{min}) s prosječnim protokom (Q_{sred}) umnožen sa 100:

$$V = 100 * \frac{(Q_{max} - Q_{min})}{Q_{sred}}$$

Tab. 4.7.2.1. Meinzerova klasifikacija izvora prema varijabilnosti protoka

%	Kategorija izvora
< 25	Konstantni
25 - 100	Subvarijabilni
> 100	Varijabilni

Izvor: Meinzer, 1923

Formula koju je osmislio Netopil izbjegava ekstremne vrijednosti već koristi koeficijent koji je rezultat omjera protoka Q_{10} i Q_{90} , odnosno protoka koji su prisutni 10 % vremena i 90 % vremena (Tab. 4.7.2.2).

Tab. 4.7.2.2. Netopilova klasifikacija izvora prema koeficijentu varijabilnosti protoka

Q_{10}/Q_{90}^*	Kategorija izvora
1,0 – 2,5	Izvanredno ujednačeni
2,5 – 5,0	Dobro ujednačeni
5,0 – 7,5	Ujednačeni
7,5 – 10,0	Neujednačeni
> 10,0	Izvanredno neujednačeni

Izvor: Netopil, 1971

Prema Meinzerovim kategorijama, i Jambrišakovo vrelo i Mali Jambrišak spadaju u varijabilne izvore. U slučaju Jambrišaka varijabilnost po Meinzeru iznosi 767,1 %, a u slučaju Malog Jambrišaka 173,8 %. Iako su oba izvora varijabilna, veća varijabilnost zabilježena je u slučaju Jambrišakova vrela. Prema Netopilovom koeficijentu varijabilnosti, Jambrišakovo vrelo pripada

izvanredno neujednačenim izvorima s koeficijentom varijabilnosti 52,1. Mali Jambrišak pripada izvanredno ujednačenim izvorima s koeficijentom 2,06.

Topografska slijevna područja Jambrišakovog vrela i Malog Jambrišaka nisu računata jer su zbog konfiguracije terena izrazito mala. Također, nalaze se na krškom području Medvednice, gdje je izraženije (dublje) podzemno otjecanje nego što je to na ostatku istraživanog područja. Veličina njihovog slijevnog područja (A) procijenjena je na temelju vodne bilance, odnosno korištenjem godišnje količine protoka (Q_{god}), godišnje količine padalina (P) te evapotranspiracije procijenjene na temelju Turcove formule (Turc, 1951) koja koristi srednju godišnju temperaturu (T) i godišnju količinu padalina (P).

$$A = Q_{\text{god}} / (P - ET)$$

$$ET = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

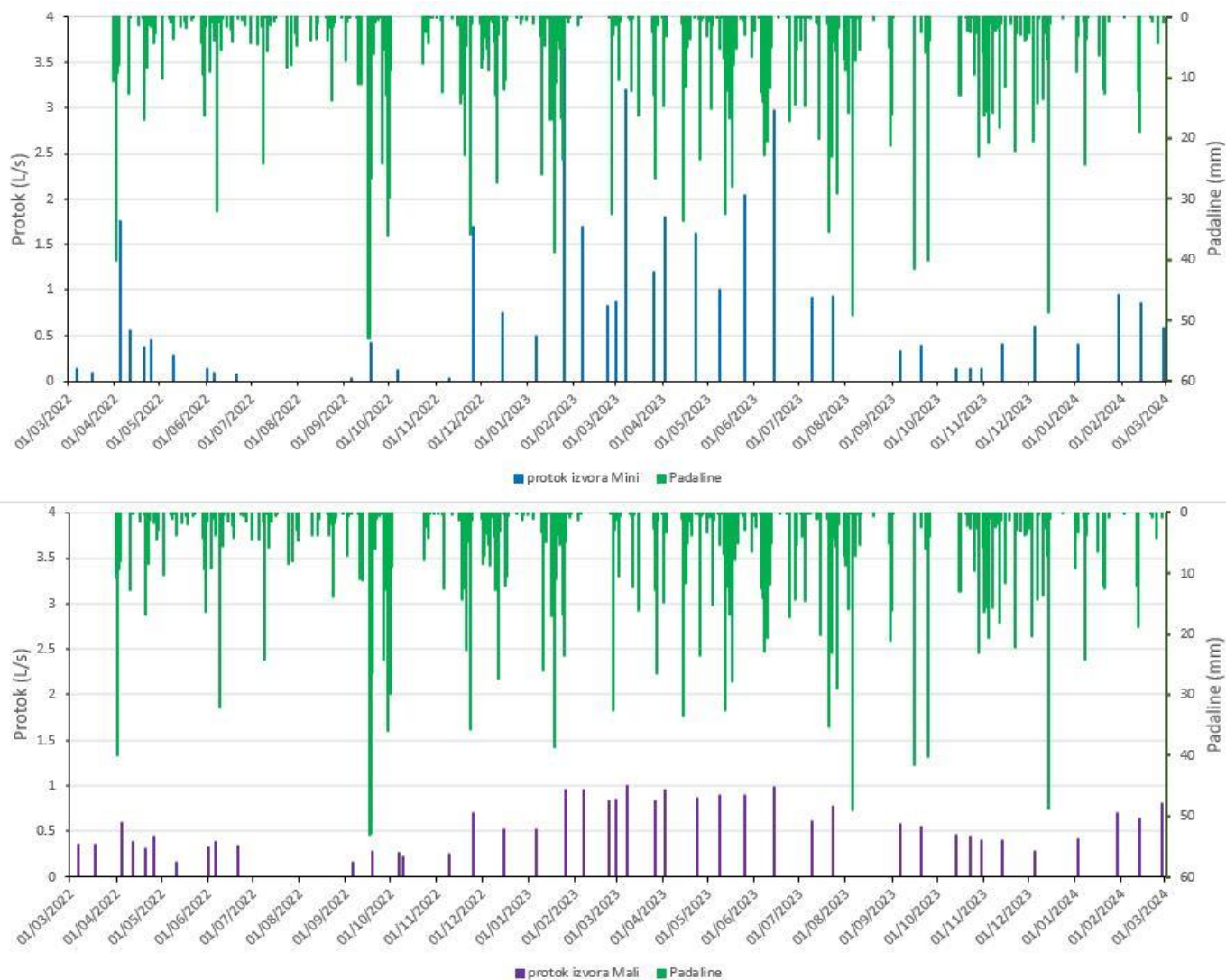
Srednja godišnja količina padalina u promatranom dvogodišnjem razdoblju određena je aritmetičkom sredinom padalina s dvije spomenute meteorološke postaje na 1190 mm. Srednja godišnja temperatura zraka iznosila je 11,22 °C izračunata istom metodom. Evapotranspiracija je prema Turcovej formuli procijenjena na 557,9 mm/god. Slijevno područje izračunato je zajedno za izvore Jambrišakovo vrelo i Mali Jambrišak zbog njihove blizine. Prema rezultatu, procijenjeno je na 92 738 m².

Hidrološka obilježja izvora Malog potoka

Izdašnost, odnosno protok na izvorima Maloga potoka nazvanima Mali i Mini praćeni su volumetrijskim mjerenjima. Ukupno je protok na izvoru Mali mjereno 42 puta, a na izvoru Mini 41 puta u razdoblju od dvije godine praćenja.

Najmanji izmjereni protok na izvoru Mali volumetrijskom metodom iznosio je 0,16 L/s, a izmjereno je 5. rujna 2022. Najveći izmjereni protok iznosio je 1 L/s, a izmjereno je 7. ožujka 2023. (Sl. 4.7.2.3). Prosječni protok izvora Mali u promatranom dvogodišnjem razdoblju na temelju aritmetičke sredine volumetrijskih mjerenja iznosi 0,55 L/s. Prema tome izvor pripada kategoriji izdašnosti VI (0,1 – 1 L/s) prema Meinzeru (1923).

U slučaju izvora Mini, najveća izmjerena vrijednost protoka bila je oko 4 L/s, izmjerena 25. siječnja 2023. Najmanja izmjerena vrijednost protoka bila je 5. rujna 2022. i iznosila je 0.029 L/s. Prosječni protok za dvogodišnje razdoblje iznosi 0,87 L/s, prema čemu izvor Mini također pripada kategoriji izdašnosti VI (0,1 – 1 L/s) prema Meinzeru (1923).



Sl. 4.7.2.3. Mjereni protoci izvora Mali i Mini u razdoblju od ožujka 2022. do veljače 2024. i dnevne količine padalina

Iako iste kategorije izdašnosti, razlika u varijabilnosti dvaju susjednih izvora je vidljiva u razlici između njihovih zabilježenih maksimuma i minimuma (Sl. 4.7.2.3). Prema Meinzerovoj metodi, varijabilnost izvora Mali iznosi 149 %, a izvora Mini 458 %. Prema tome oba izvora pripadaju varijabilnim izvorima. Korištenjem koeficijenta varijacije (Netopil, 1971), izvor Mali pripada u

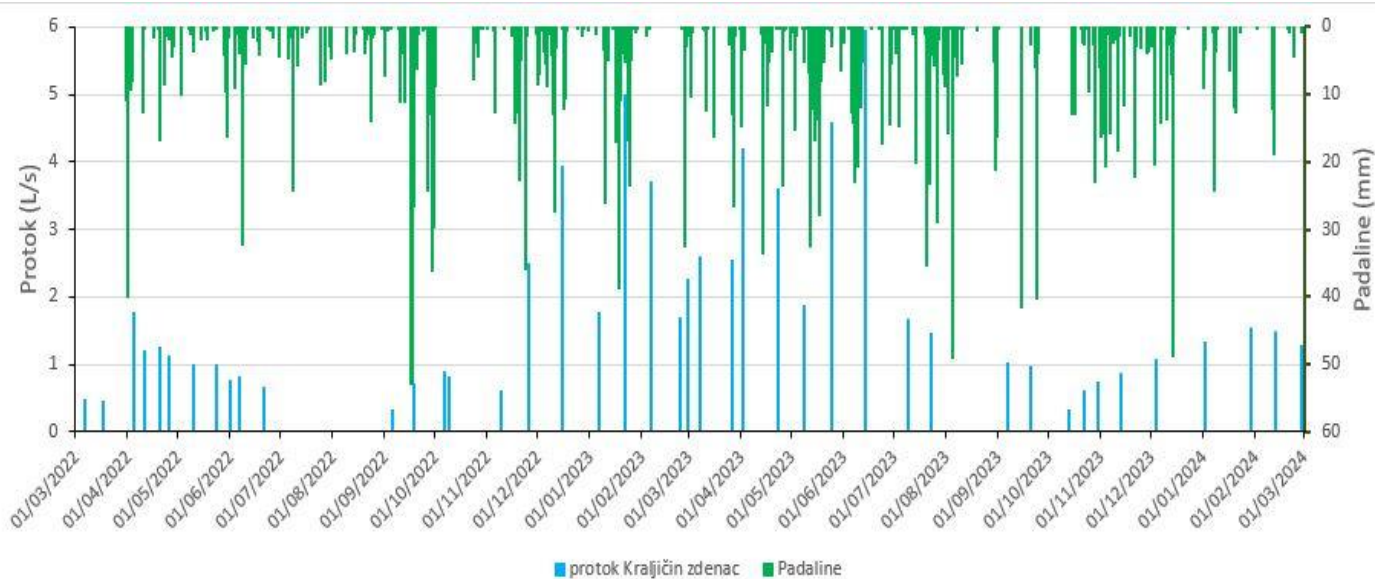
dobro ujednačene izvore, s koeficijentom 3,78, a izvor Mini pripada u kategoriju izvanredno neujednačenih izvora s koeficijentom varijabilnosti 22,32.

Zajedničko slijevno područje izvora Mali i Mini izračunom vodne bilance procijenjeno je na 83 825 m², dok je GIS analizom izračunata veličina topografske slijevne površine od 126 771 m².

Hidrološka obilježja Kraljičinog zdenca

Protoci izvora Kraljičin zdenac praćeni su volumetrijskim mjerenjima. Ukupno su obavljena 44 mjerenja u razdoblju od dvije godine praćenja. Najmanji izmjereni protok na izvoru Kraljičin zdenac iznosio je 0,31 L/s, a izmjereno je 13. studenog 2023. Najveći izmjereni protok iznosio je 5,95 L/s, a izmjereno je 14. lipnja 2023. (Sl. 4.7.2.4). Prosječan protok Kraljičinog zdenca u promatranom dvogodišnjem razdoblju na temelju aritmetičke sredine volumetrijskih mjerenja iznosi 1,7 L/s. Prema tome izvor pripada kategoriji izdašnosti V (1 – 10 L/s) prema Meinzeru (1923).

Prema Meinzeru, Kraljičin zdenac pripada varijabilnim izvorima uz varijabilnost od 332 %. Prema koeficijentu varijabilnosti on je neujednačen, uz vrijednost koeficijenta od 8,93. Slijevna površina Kraljičinog zdenca izračunata preko vodne bilance iznosi oko 87 568 m², dok je GIS analizom izračunato topografsko slijevno područje znatno manje i iznosi 27 456 m².

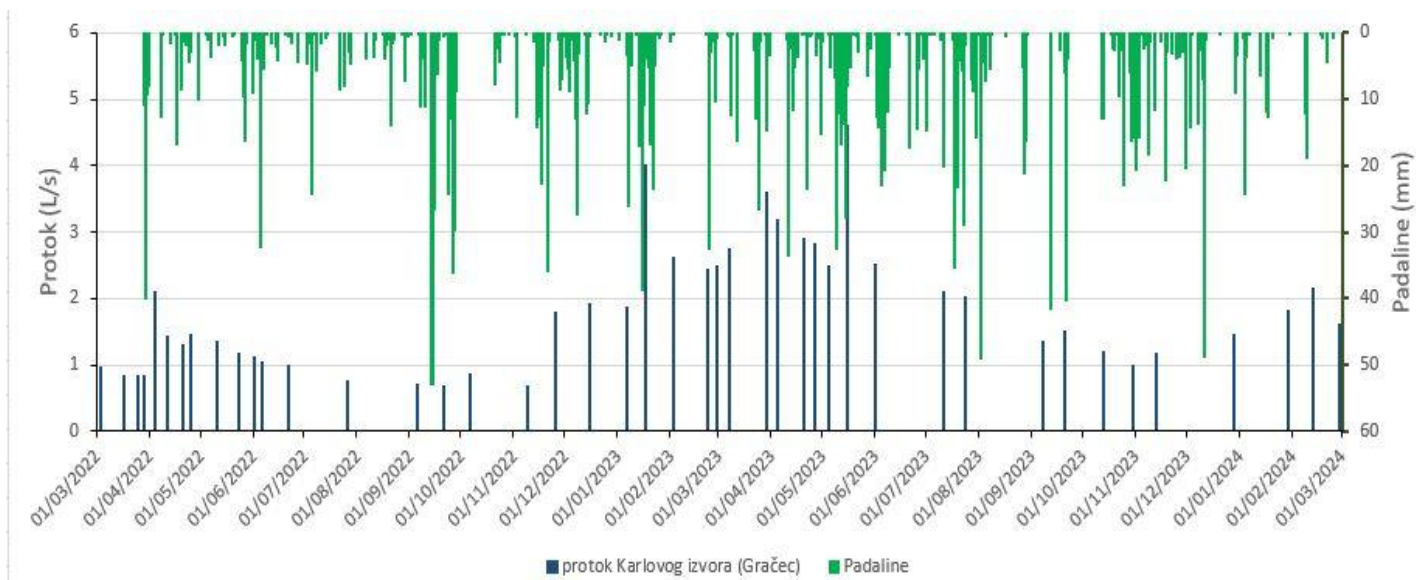


Sl. 4.7.2.4. Mjereni protoci izvora Kraljičin zdenac u razdoblju od ožujka 2022. do veljače 2024. i dnevne količine padalina

Hidrološka obilježja Karlovog izvora (Gračec)

Protoci Karlovog izvora praćeni su volumetrijskim mjerenjima. Ukupno su obavljena 44 mjerenja u razdoblju od dvije godine praćenja. Najmanji izmjereni protok na Karlovom izvoru iznosio je 0,681 L/s, a izmjeren je 20. rujna 2022. Najveći izmjereni protok iznosio je 4,01 L/s, a izmjeren je 18. siječnja 2023. (Sl. 4.7.2.5). Prosječni protok Karlovog izvora u promatranom dvogodišnjem razdoblju na temelju aritmetičke sredine volumetrijskih mjerenja iznosi 1,81 L/s. Prema tome izvor pripada kategoriji izdašnosti V (1 – 10 L/s).

Prema Meinzeru, Karlov izvor pripada varijabilnim izvorima uz varijabilnost od 217 %. Prema koeficijentu varijabilnosti on je dobro ujednačen, uz vrijednost koeficijenta od 4,25. Slijevna površina Karlovog izvora izračunata preko vodne bilance iznosi oko 93 047 m², dok je GIS analizom izračunato topografsko slijevno područje više nego dvostruko manje i iznosi 44 342 m².



Sl. 4.7.2.5. Mjereni protoci Karlovog izvora u razdoblju od ožujka 2022. do veljače 2024. i dnevne količine padalina

Korelacija mjerenih protoka između izvora

Kako bi se utvrdila mogućnost povezivanja kontinuirano mjerenih vrijednosti vodostaja, odnosno protoka na Jambrišakovom vrelu s ostalim praćenim izvorima, izračunat je Pearsonov koeficijent korelacije za vrijednosti protoka mjerene na iste datume. Koeficijent je također izračunat za sve

praćene izvore međusobno. Treba uzeti u obzir kako su izvori Mini, Mali i Kraljičin zdenac imali 40 mjerenja ostvarenih na isti dan, dok je Karlov izvor imao 24 mjerenja ostvarena na isti dan kad i prethodno tri nabrojana. Izvori Jambrišakovo vrelo i Mali Jambrišak imali su samo 7 podudarnih datuma s prethodna 4 spomenuta izvora, a međusobno njih 13. Također su korišteni i podaci o protoku Jambrišakovog vrela dobiveni mjernim uređajem, odnosno krivuljom protoka. Odnosi između svih izvora pokazali su pozitivan odnos korelacije. Gledajući protoke izvora u usporedbi s protocima Jambrišakovog vrela dobivenih preko mjernog uređaja samo izvor Mini pokazao je značajnu vrlo dobru povezanost.

Izvor Mini i Jambrišakovo vrelo pokazali su najveću korelaciju na temelju isključivo volumetrijskih mjerenja (Tab. 4.7.2.3). Jambrišakovo vrelo općenito je pokazalo vrlo dobru korelaciju sa svim izvorima, međutim to je vjerojatno rezultat malog broja uzoraka, odnosno mjerenja (7 mjerenja; vrijednost vjerojatnosti $p > 0,05$). Izvori Mini i Kraljičin zdenac pokazali su vrlo snažnu povezanost ($r=0,833$), kao i izvor Mali i Karlov izvor ($r=0,864$) te Karlov izvor i izvor Mini ($r=0,819$, Tab. 4.7.2.3). Karlov izvor također je pokazao vrlo snažnu povezanost protoka s izvorom Mali Jambrišak, ali treba napomenuti da se i ovdje radi o samo 7 mjerenja ($p > 0,05$).

Tab. 4.7.2.3. Korelacijska matrica protoka izvora mjerenih na iste dane u promatranom dvogodišnjem razdoblju

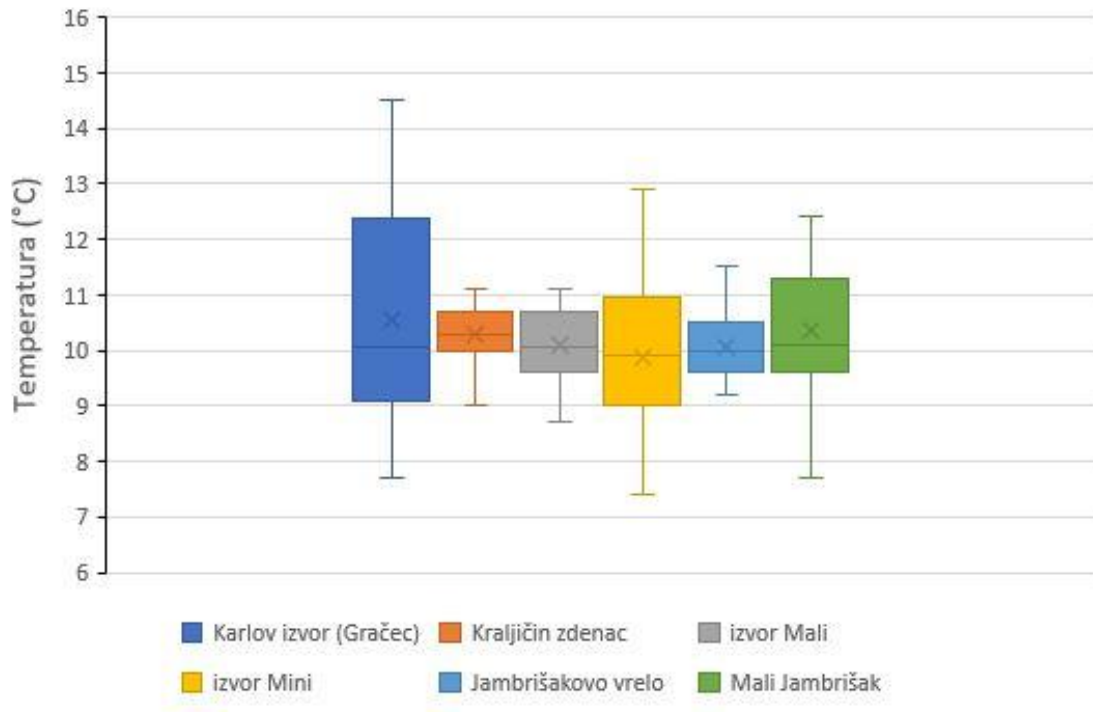
	izvor Mini	izvor Mali	Kraljičin zdenac	Karlov izvor	Jambrišakovo vrelo (uređaj)	Jambrišakovo vrelo (volumetrijski)	Mali Jambrišak
Mini	1	0,787	0,833	0,819	0,782	0,977	0,770
Mali	0,787	1	0,749	0,864	0,556	0,900	0,423
Kraljičin zdenac	0,833	0,749	1	0,770	0,578	0,886	0,405
Karlov izvor	0,819	0,864	0,770	1	0,433	0,963	0,828
Jambrišakovo vrelo (praćenje)	0,782	0,556	0,578	0,433	1	x	0,684
Jambrišakovo vrelo (volumetrijski)	0,977	0,900	0,886	0,963	x	1	0,936
Mali Jambrišak	0,770	0,423	0,405	0,828	0,684	0,936	1

4.7.3. Fizikalno-kemijska obilježja vode praćenih izvora

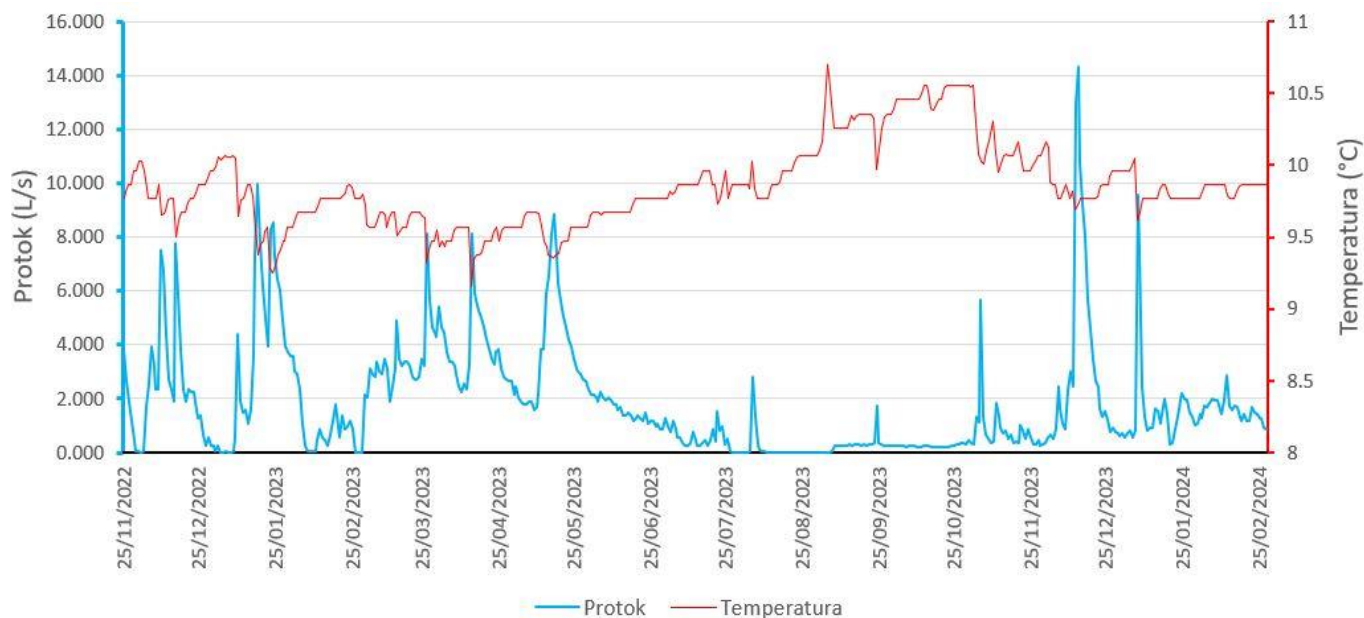
Fizikalno-kemijska obilježja praćena su uz volumetrijska mjerenja izvora, korištenjem prijenosnog multimetra. Osim toga, tri puta je provedena laboratorijska analiza kationa, aniona i karbonatnih iona izvorske vode u svrhu dobivanja hidrogeokemijskog facijesa, odnosno tipa. Analiza je provedena u Laboratoriju za analizu geoloških materijala Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta sveučilišta u Zagrebu. Korištena je metoda ionske kromatografije i titracije klorovodičnom kiselinom u IC sustavu Dionex ICS-9.

Temperature praćenih izvora

Temperatura vode mjerena multimetrom (46 mjerenja) na Jambrišakovom vrelu kretala se od minimalnih 9,2 °C (izmjereno početkom ožujka 2022. i u siječnju 2023) do 10,8 °C (izmjereno u rujnu i listopadu 2022. i 2023; Sl. 4.7.3.1). Aritmetička sredina izmjerenih temperatura iznosi 10,1 °C. Uz pomoć uređaja (*data logger*) u istom izvoru također su stalno praćene temperature vode (Sl. 4.7.3.1). Minimalna zabilježena temperatura mjerena na taj način bila je 9,2 °C (14. travnja 2023.), a maksimalna 10,7 °C (4. rujna 2023.), što prema rasponu odgovara i mjerenjima multimetrom.



Sl. 4.7.3.1. Rasponi izmjerenih temperatura na praćenim izvorima



Sl. 4.7.3.2. Temperatura i protok Jambrišakovog vrela u razdoblju od studenog 2022. do veljače 2024.

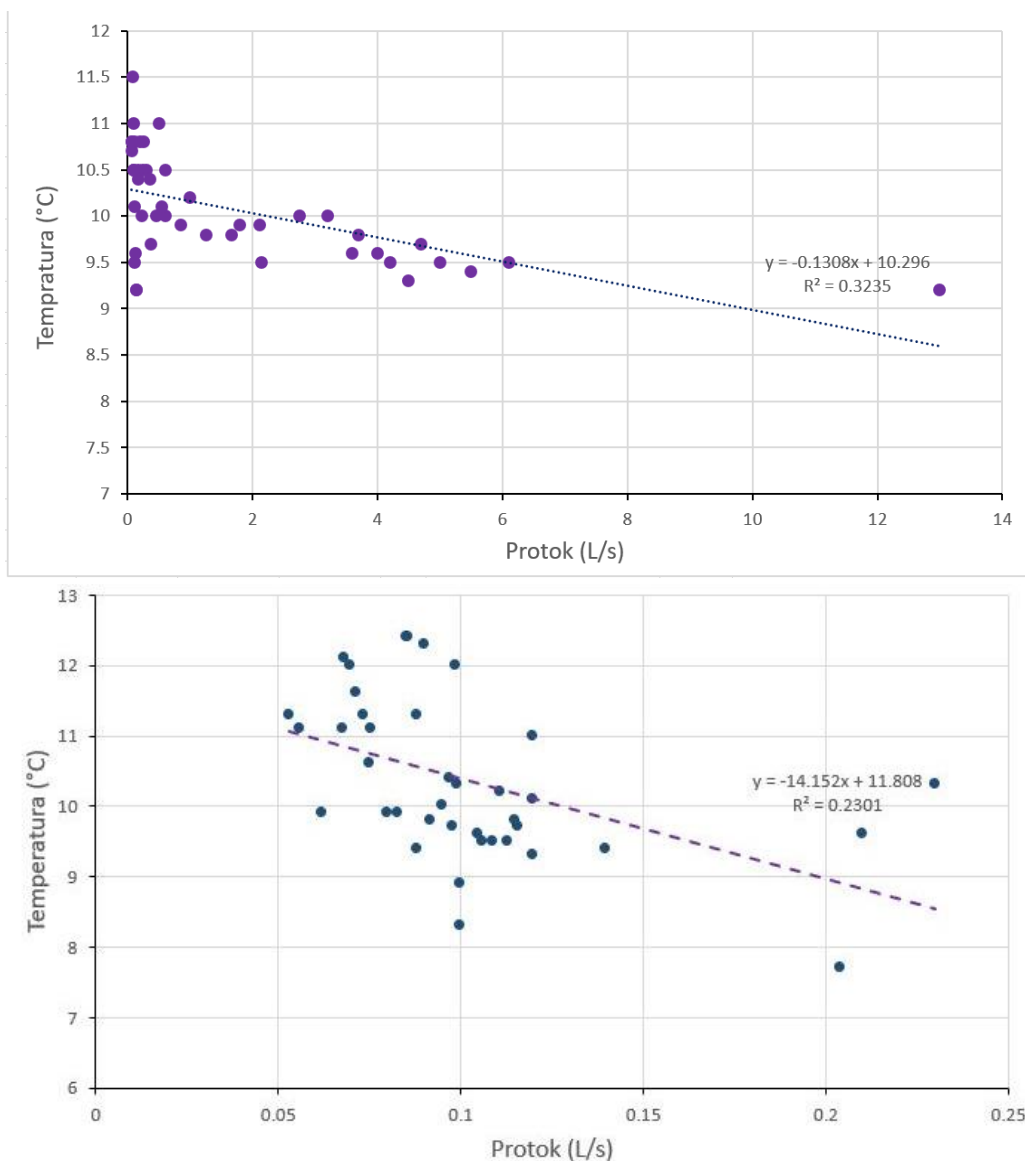
Na izvoru Mali Jambrišak raspon izmjerenih temperatura multimetrom kretao se od 7,7 °C zabilježenih u travnju 2022., do 12,4 °C izmjerenih u rujnu i listopadu 2023. Srednja vrijednost izmjerenih temperatura iznosi 10,4 °C (Sl. 4.7.3.1).

Na izvoru Mali (potok Čnomerec) raspon mjerenih temperatura kretao se od 8,7 °C zabilježenih u travnju 2022. i veljači 2023., do 11,1 °C izmjerenih u rujnu 2023. Izračunata srednja temperatura iznosi 10,1 °C (Sl. 4.7.3.1). Na susjednom izvoru Mini, najniža izmjerena temperatura bila je u ožujku 2022 i iznosila je 7,4 °C. Najveća izmjerena temperatura istog izvora je 12,9 °C, zabilježena u rujnu 2022. Srednja temperatura za promatrano razdoblje je 9,9 °C (Sl. 4.7.3.1). Kretanje temperature vode pokazalo je određenu sezonalnost. Temperature padaju zimi i najniže su u proljeće. U svibnju počinju rasti sve do rane jeseni (listopad), kada ponovno kreću padati. Međutim, treba napomenuti kako postoje amplitude unutar godišnjih doba, ali manje od 1 °C (Sl. 4.7.3.2).

Na izvoru Kraljičin zdenac, minimalna zabilježena temperatura vode je 8,8 °C, izmjerena u ožujku 2022. Maksimalna zabilježena temperatura bila je u srpnju 2023. i iznosila je 11,1 °C. Srednja temperatura izvorske vode za Kraljičin zdenac u mjerenom razdoblju iznosi 10,3 °C.

Na Karlovom izvoru najniža temperatura od 7,7 °C također je izmjerena u ožujku 2022. Najviša temperatura bila je u rujnu 2022. kada je izmjereno 14,5 °C. Izračunata srednja temperatura Karlovog izvora je 10,5 °C (Sl. 4.7.3.1).

Izmjerene temperature stavljene su u odnos s izmjerenim protocima (izdašnosti) u trenutku mjerenja. Metodom izrade linearnog trenda uspostavljen je odnos temperature vode i protoka. U slučaju Jambrišakovog vrela i Malog Jambrišaka uočen je negativan temperaturni trend s porastom protoka s naznakom da linija trenda u slučaju Malog Jambrišaka mnogo strmije pada (Sl. 4.7.3.3).

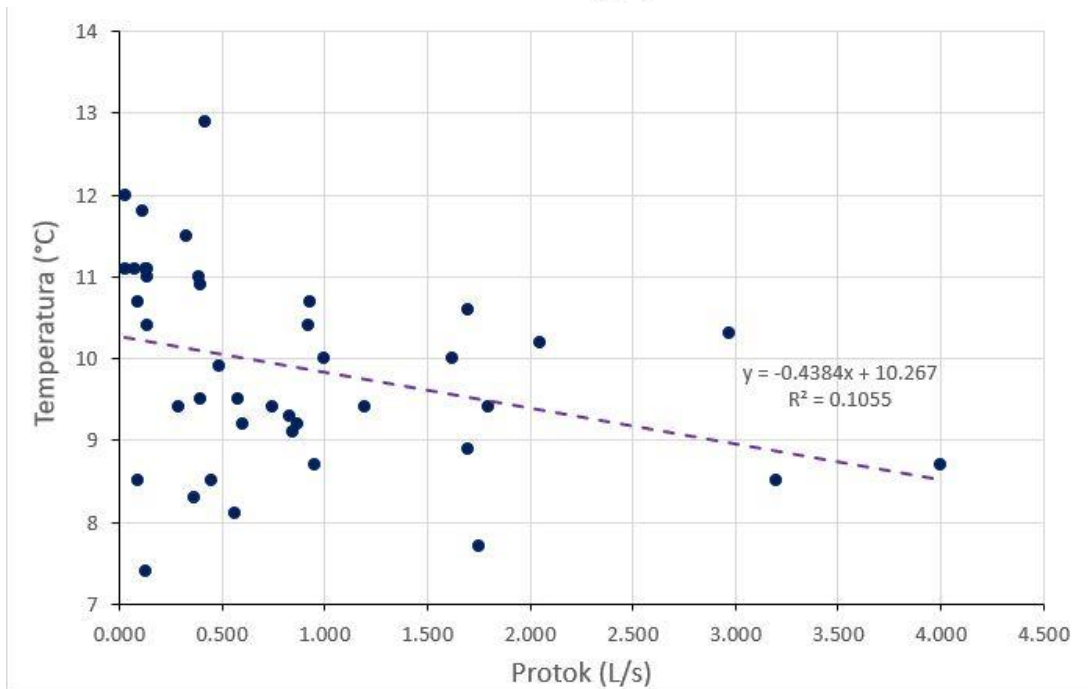
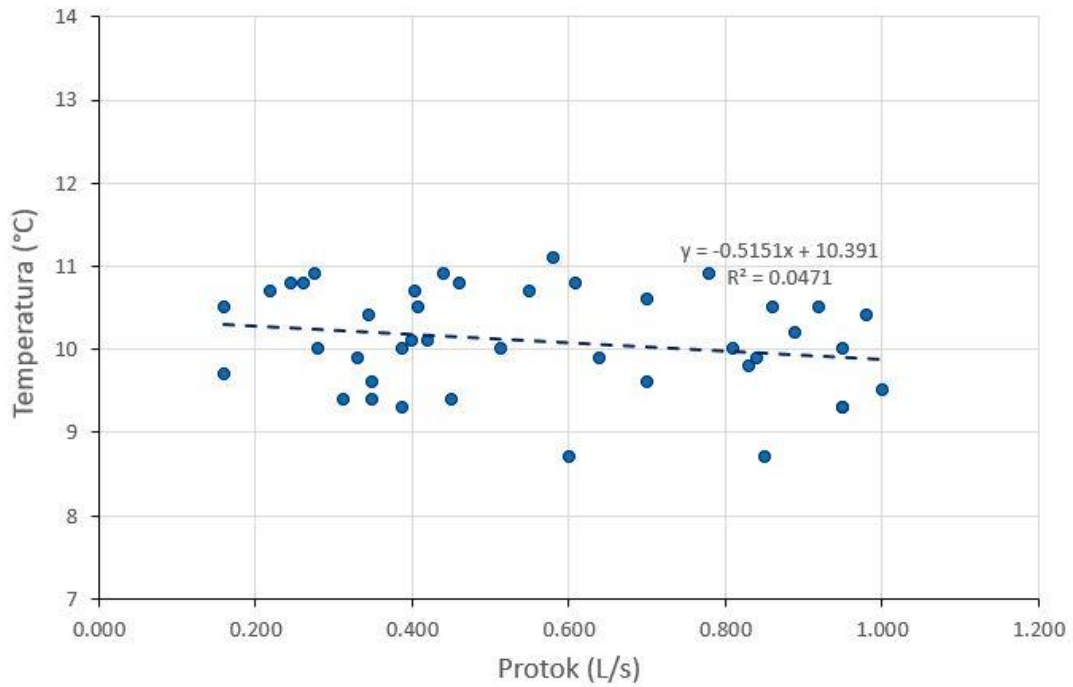


Sl. 4.7.3.3. Odnos temperature i protoka na Jambrišakovom vrelu (gore) i Malom Jambrišaku (dolje)

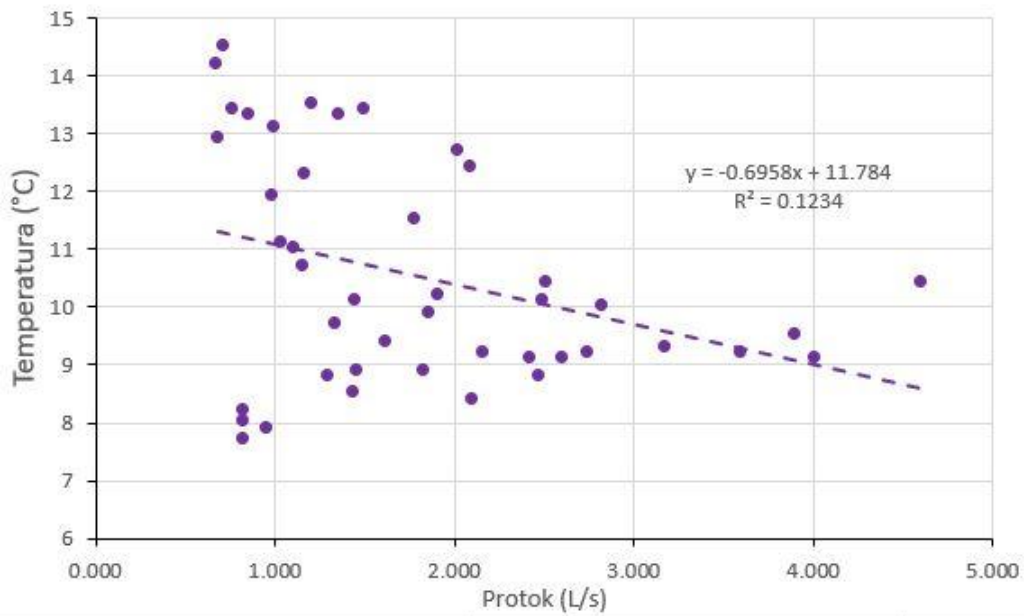
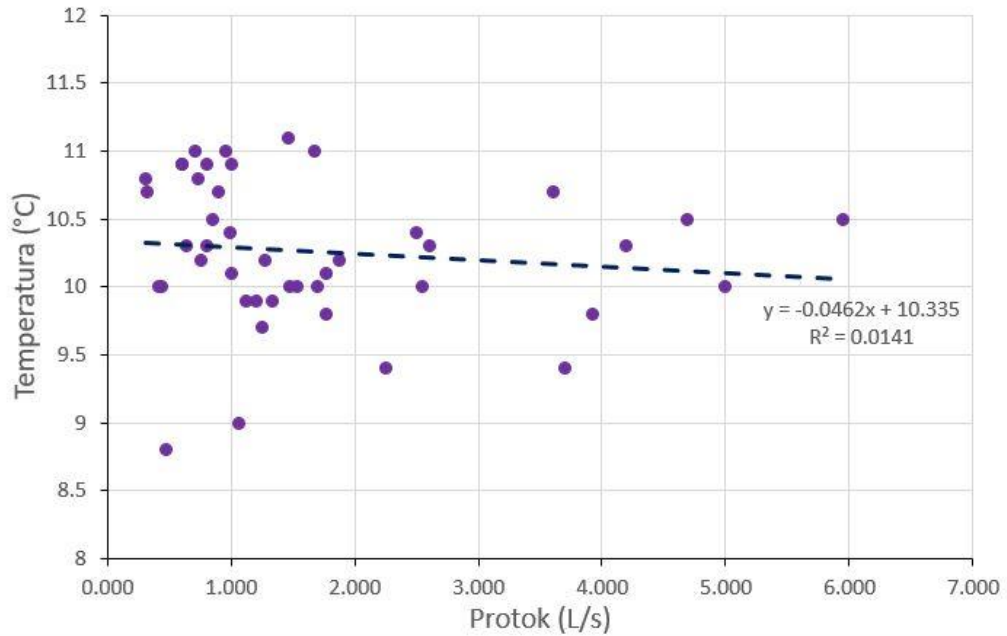
Umjerenu negativnu povezanost temperature i protoka pokazali su i koeficijenti korelacije ($r = -0,57$ kod Jambrišakovog vrela, $r = -0,48$ kod Malog Jambrišaka). Treba napomenuti kako vrijednosti R^2 kod oba izvora pokazuju da se odnos ne može jednostavno objasniti korištenjem linearnog trenda (Sl. 4.7.3.3).

Kod izvora Mali i Mini (Mali potok – potok Črnomerec) također je prisutan silazni trend u odnosu izmjerenih temperatura i protoka. Trendovi su podjednaki, uz nešto jači nagib linije u slučaju izvora Mali (Sl. 4.7.3.4). Treba reći da koeficijent korelacije pokazuje slabu negativnu povezanost između temperature i protoka kod oba izvora ($r = -0,23$ kod izvora Mali, $r = -0,34$ kod izvora Mini). Treba napomenuti kako su vrijednosti R^2 vrlo niske kod oba izvora Malog potoka, što pokazuju da odnos ovih veličina nije značajno linearno povezan (Sl. 4.7.3.4).

Izvor Kraljičin zdenac ima blago silazni trend vrijednosti temperature s povećanjem protoka, dok je u slučaju Karlovog izvora vrlo izražen pad linije trenda temperature s povećanjem protoka (Sl. 4.7.3.5). Koeficijent korelacije u slučaju Kraljičinog zdenca pokazuje vrlo slabu negativnu povezanost temperature i izdašnosti ($r = -0,15$), a u slučaju Karlovog izvora slabu negativnu povezanost ($r = -0,38$). Vrijednosti R^2 vrlo su niske i kod Kraljičinog zdenca i kod Karlovog izvora, što ukazuje da odnos temperature i protoka nije značajno linearno povezan (Sl. 4.7.3.5).



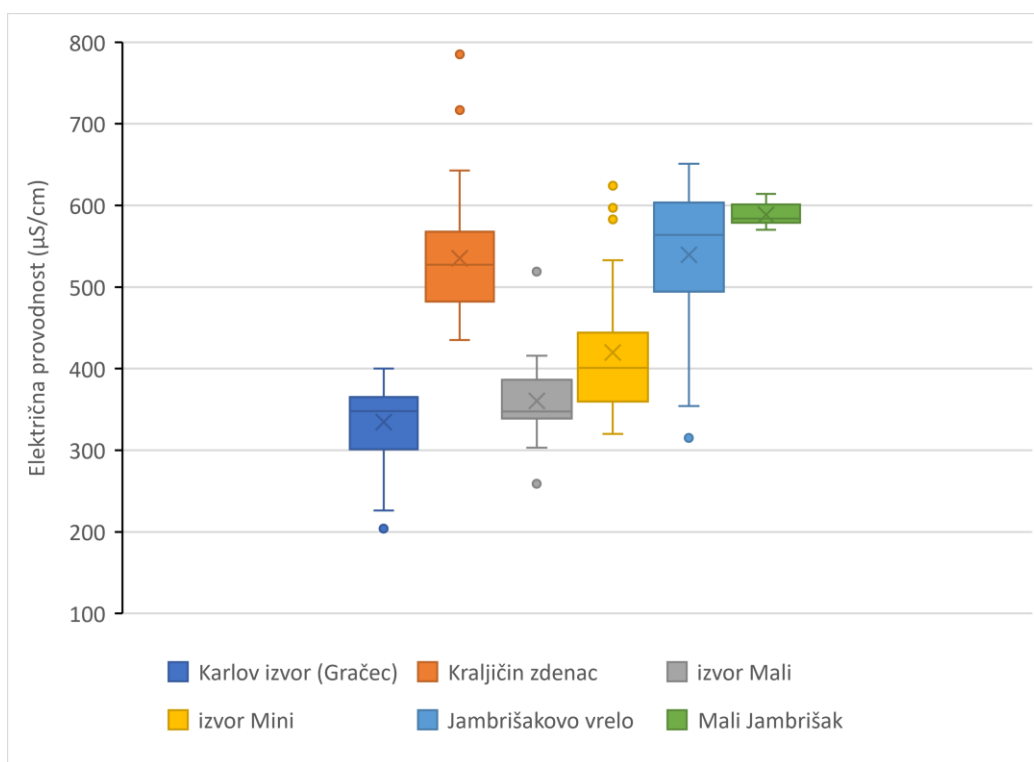
Sl. 4.7.3.4. Odnos temperature i protoka na izvoru Mali (gore) i izvoru Mini (dolje)



Sl. 4.7.3.5. Odnos temperature i protoka na izvoru Kraljičin zdenac (gore) i Karlovom izvoru (dolje)

Električna provodnost praćenih izvora (EC)

Vrijednosti EC mjerene multimetrom na Jambrišakovom vrelu kretale su se od minimalnih 315 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (izmjereno u rujnu 2022., neposredno nakon oborina) do 651 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (izmjereno u lipnju 2022.; Sl. 4.7.3.6). Aritmetička sredina izmjerenih vrijednosti EC iznosi 539 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Pomoću uređaja (data logger) u Jambrišakovom vrelu također je kontinuirano mjerena EC (Sl. 4.7.3.6). Minimalna EC zabilježena na taj način bila je 249 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (5. kolovoza 2023.), a maksimalna 607 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (8. siječnja 2023.), što je nešto niže od ručno mjenjenih vrijednosti. Aritmetička sredina dobivena iz podataka mjernog uređaja (*data logger*) iznosi 497 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Sl. 4.7.3.7).



Sl. 4.7.3.6. Rasponi izmjerenih vrijednosti električne provodnosti (EC) na praćenim izvorima

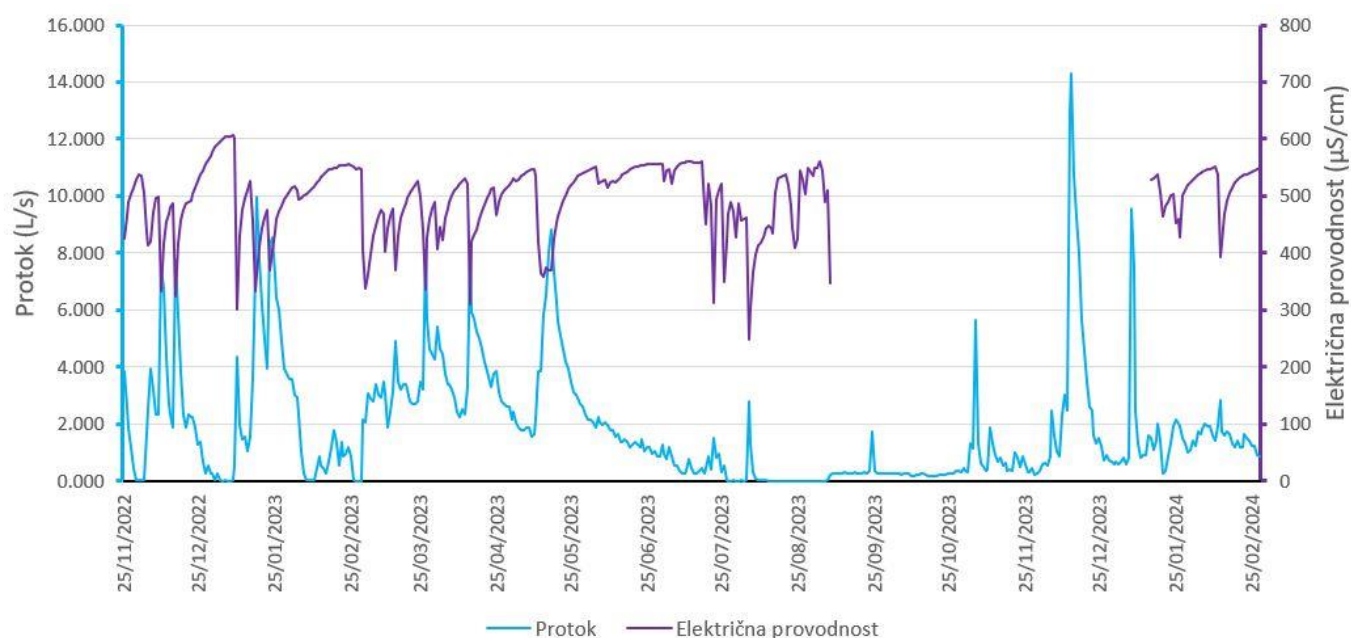
Na izvoru Mali Jambrišak raspon vrijednosti EC kretao se od 570 $\mu\text{S}/\text{cm}$ zabilježenih u veljači 2022., do 614 $\mu\text{S}/\text{cm}$ izmjerenih u travnju 2022. Srednja vrijednost EC iznosi 588 $\mu\text{S}/\text{cm}$ na temelju terenski mjerenja (Sl. 4.7.3.6).

Na izvoru Mali (potok Črnomerec) raspon mjenjenih vrijednosti EC kretao se od 259 $\mu\text{S}/\text{cm}$ zabilježenih u studenom 2022., do 416 $\mu\text{S}/\text{cm}$ izmjerenih u ožujku 2022. Izračunata srednja vrijednost EC je 356 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Sl. 4.7.3.6). Na susjednom izvoru Mini, najniža izmjerena EC bila je u prosincu 2022. i iznosila je 320 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Najveća izmjerena EC istog izvora u promatranom

razdoblju je 624 $\mu\text{S}/\text{cm}$, zabilježena u rujnu 2022. Međutim, treba napomenuti kako je u trenutku kartiranja izvora, u ožujku 2019. izmjerena vrijednost od 1183 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Srednja vrijednost EC za promatrano razdoblje je 420 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Sl. 4.7.3.6).

Na izvoru Kraljičin zdenac, minimalna zabilježena vrijednost EC je 435 $\mu\text{S}/\text{cm}$, izmjerena u lipnju 2023. Maksimalna zabilježena vrijednost EC bila je u rujnu 2022. i iznosila je 785 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Srednja vrijednost EC za Kraljičin zdenac iznosi 535 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Sl. 4.7.3.6).

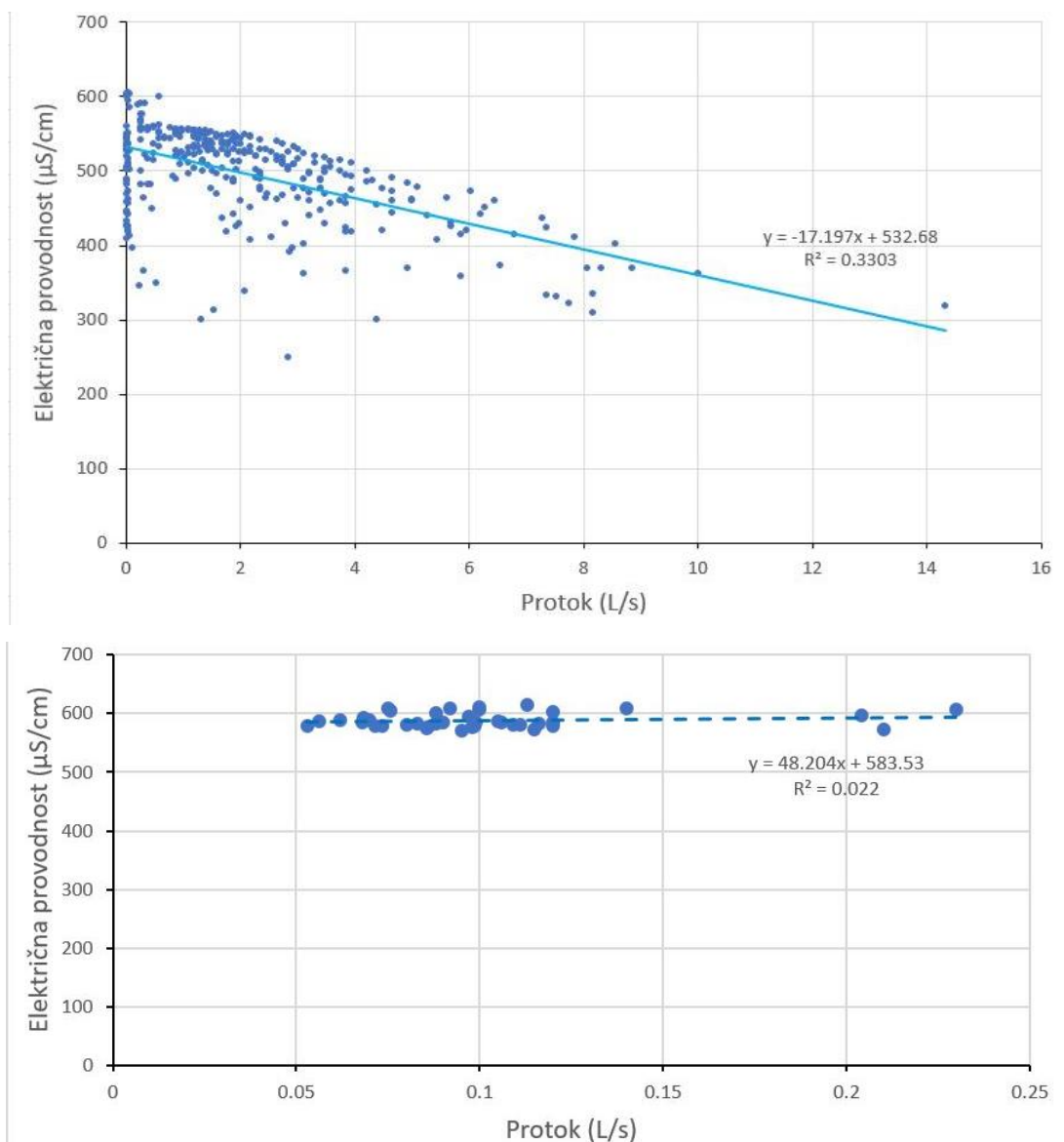
Na Karlovom izvoru najniža zabilježena EC od 204 $\mu\text{S}/\text{cm}$ zabilježena je u siječnju 2023. Najviša vrijednost EC bila je u rujnu 2023. kada je izmjereno 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Prosječna izmjerena EC Karlovog izvora iznosi 335 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Sl. 4.7.3.6).



Sl. 4.7.3.7. Vrijednosti električne provodnosti (EC) vode i protoka Jambrišakovog vrela u razdoblju od studenog 2022. do veljače 2024.

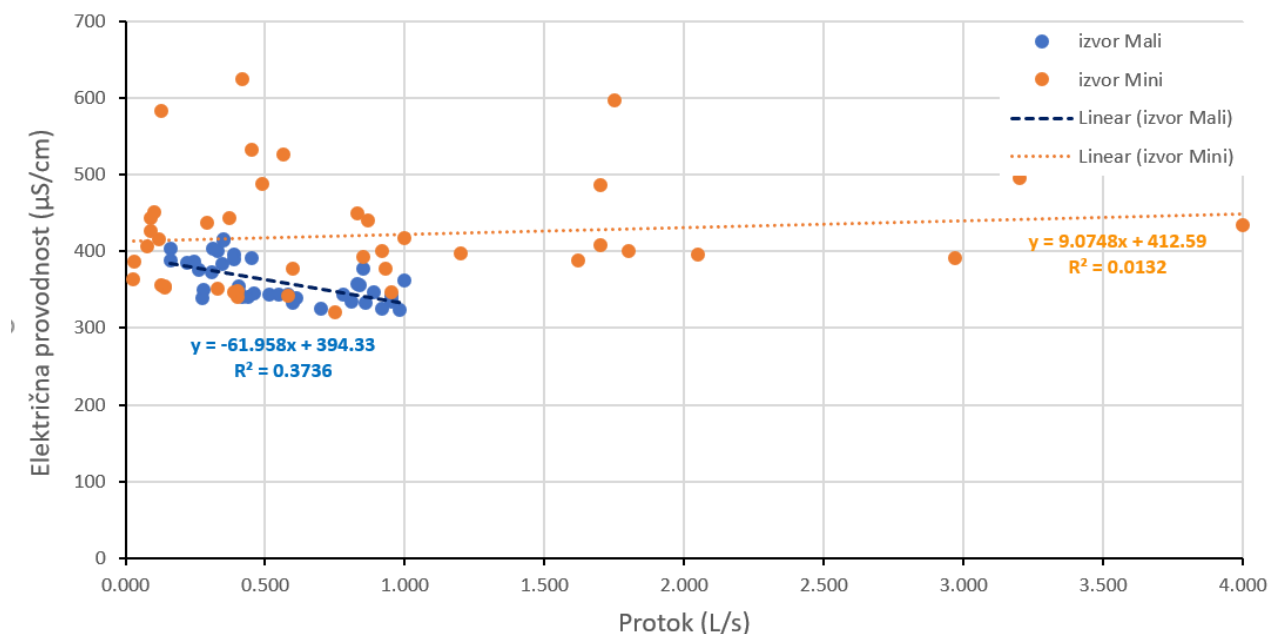
Izmjerene vrijednosti EC stavljene su u odnos s izmjerenim protocima (izdašnošću) u trenutku mjerenja. Na temelju praćenih podataka u Jambrišakovom vrelu vidljivo je poklapanje vršnih vrijednosti protoka (maksimuma) s minimalnim vrijednostima EC (minimumi) (Sl. 4.7.3.7). Također je vidljivo recipročno kretanje krivulja, odnosno vrijednosti EC i protoka. Prilikom rasta protoka, vrijednost EC istovremeno pada, a prilikom pada protoka vrijednost EC istovremeno raste (Sl. 4.7.3.7).

Kako bi se pokazala povezanost EC i protoka izračunat je linearni trend između te dvije veličine. U slučaju Jambrišakovog vrela uočen je negativan trend EC, odnosno njezin pad s porastom protoka. Na to ukazuje i snažna negativna korelacija ($r=-0,57$). U slučaju Malog Jambrišaka linija trenda zapravo pokazuje relativnu stagnaciju u vrijednostima EC, bez obzira na promjene u protoku (Sl. 4.7.3.8). Koeficijent korelacije u slučaju Malog Jambrišaka pokazuje vrlo slabu pozitivnu povezanost ($r = 0,15$). Treba napomenuti kako je vrijednosti R^2 relativno niska u slučaju Jambrišakovog vrela ($R^2=0,3303$), a vrlo niska u slučaju Malog Jambrišaka ($R^2=0,022$), zbog toga linearni odnos EC i protoka treba analizirati s oprezom (Sl. 4.7.3.8).



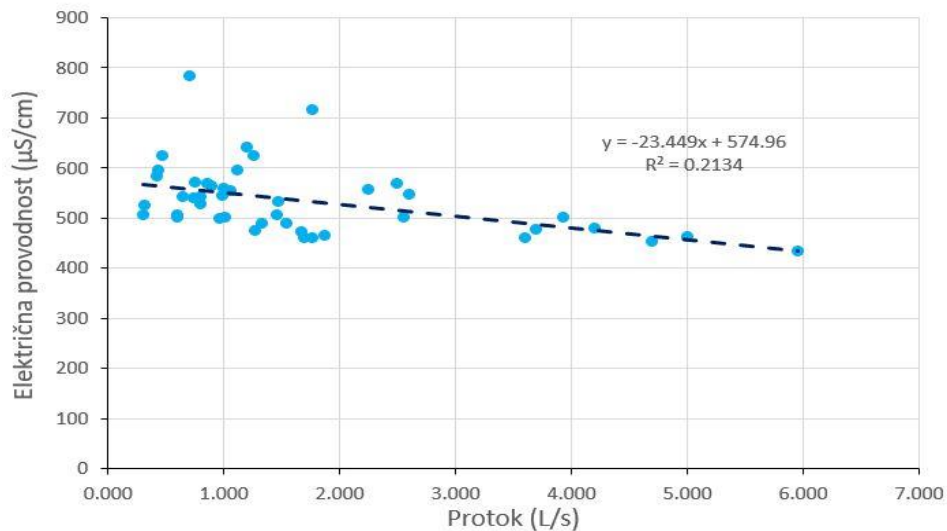
Sl. 4.7.3.8. Odnos električne provodnosti (EC) i protoka na Jambrišakovom vrelu (gore) i Malom Jambrišaku (dolje)

Kod izvora Mali i Mini (Mali potok – potok Črnomerec) također je analiziran odnos EC i protoka. Kod izvora Mali vidljiv je silazni trend, odnosno pad vrijednosti EC s porastom protoka, što pokazuje i umjerena negativna korelacija ($r = -0,56$). U slučaju izvora Mini vidljiv je vrlo blagi uzlazni trend, odnosno blagi porast vrijednosti EC s vrijednošću protoka (Sl. 4.7.3.9), što je vidljivo i u koeficijentu korelacije između tih dviju vrijednosti ($r = 0,11$). Vrijednost R^2 relativno je niska u slučaju izvora Mali ($R^2=0,3736$), a vrlo niska u slučaju izvora Mini ($R^2=0,0132$), zbog toga linearni odnos EC i protoka treba analizirati s oprezom (Sl. 4.7.3.10).

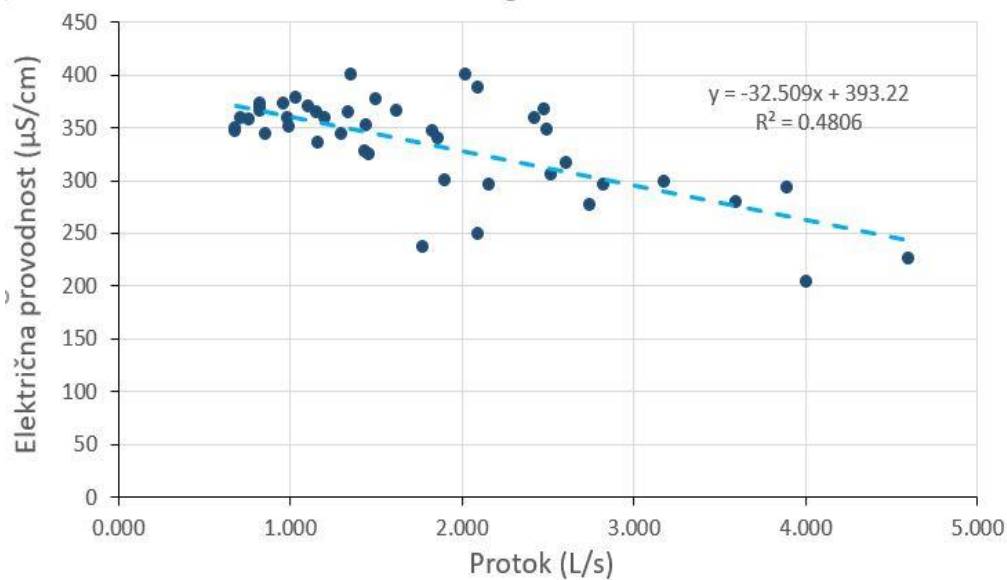


Sl. 4.7.3.9. Odnos izmjerenih vrijednosti električne provodnosti (EC) i protoka na izvorima Mali i Mini

Izvor Kraljičin zdenac ima silazni trend vrijednosti EC s povećanjem protoka (Sl. 4.7.3.10), kao što je to i kod Karlovog izvora (Sl. 4.7.3.11). U slučaju Kraljičinog zdenca koeficijent korelacije pokazuje umjerenu negativnu povezanost protoka i EC ($r = -0,47$), a u slučaju Karlovog izvora snažnu negativnu povezanost ($r = -0,70$). Vrijednosti R^2 relativno je niska u slučaju izvora Kraljičin zdenac ($R^2=0,2134$), a umjerena u slučaju Karlovog izvora ($R^2=0,4806$), zbog toga linearni odnos EC i protoka treba analizirati s oprezom (Sl. 4.7.3.11).



Sl. 4.7.3.10. Odnos izmjerenih vrijednosti električne provodnosti (EC) i protoka na izvoru Kraljičin zdenac



Sl. 4.7.3.11. Odnos izmjerenih vrijednosti električne provodnosti i protoka na Karlovom izvoru

Izmjerene vrijednosti pH vode praćenih izvora

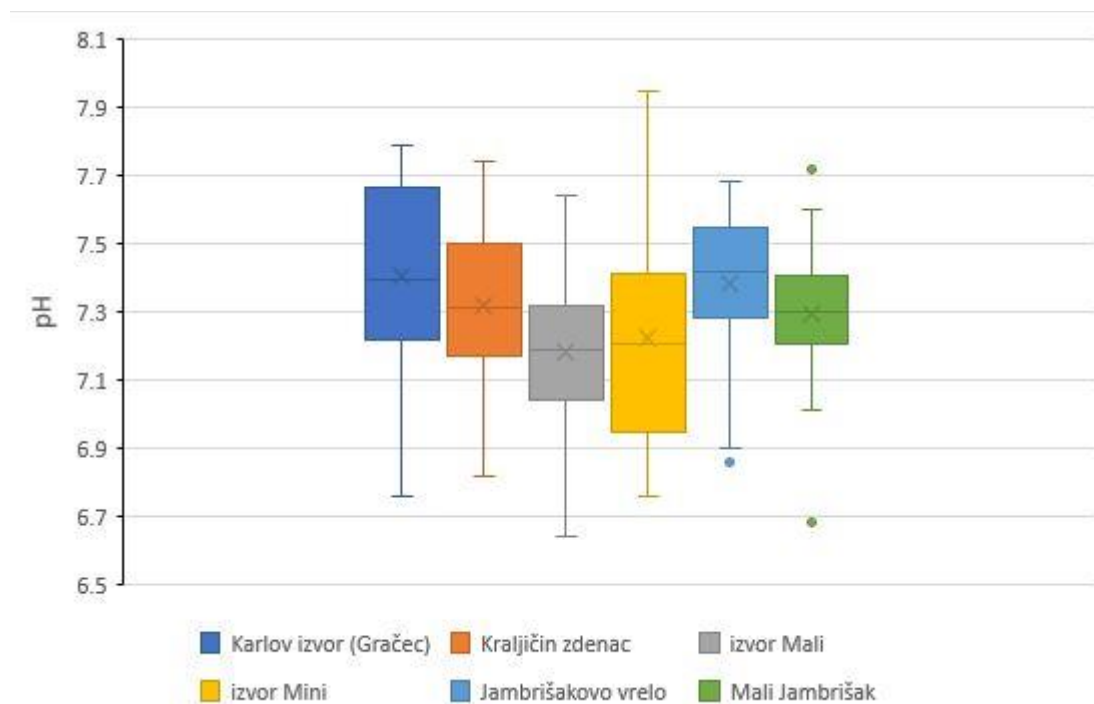
Vrijednosti pH mjerene na Jambrišakovom vrelu kretale su se od minimalnih 6.86 (izmjereno u veljači 2024.) do 7,68 (izmjereno u prosincu 2022.; Sl. 4.7.3.12). Aritmetička sredina izmjerenih vrijednosti pH iznosi 7,38. Na izvoru Mali Jambrišak raspon mjerenih vrijednosti pH kretao se od

6,68 zabilježenih u veljači 2024., do 7,72 izmjerenih u ožujku 2022. Srednja vrijednost pH iznosi 7,29 (Sl. 4.7.3.12).

Na izvoru Mali (potok Črnomerec) raspon vrijednosti pH kretao se od 6.64 zabilježenih u studenom 2022., do 7,64 izmjerenih u lipnju 2022. Srednja vrijednost pH iznosi 7,17 (Sl. 4.7.3.12). Na susjednom izvoru Mini, najniža izmjerena vrijednost pH bila je u veljači 2024. i iznosila je 6,76. Najveća izmjerena vrijednost pH istog izvora je 7,95, zabilježena u ožujku 2022. Srednja vrijednost pH za promatrano razdoblje je 7,21 (Sl. 4.7.3.12).

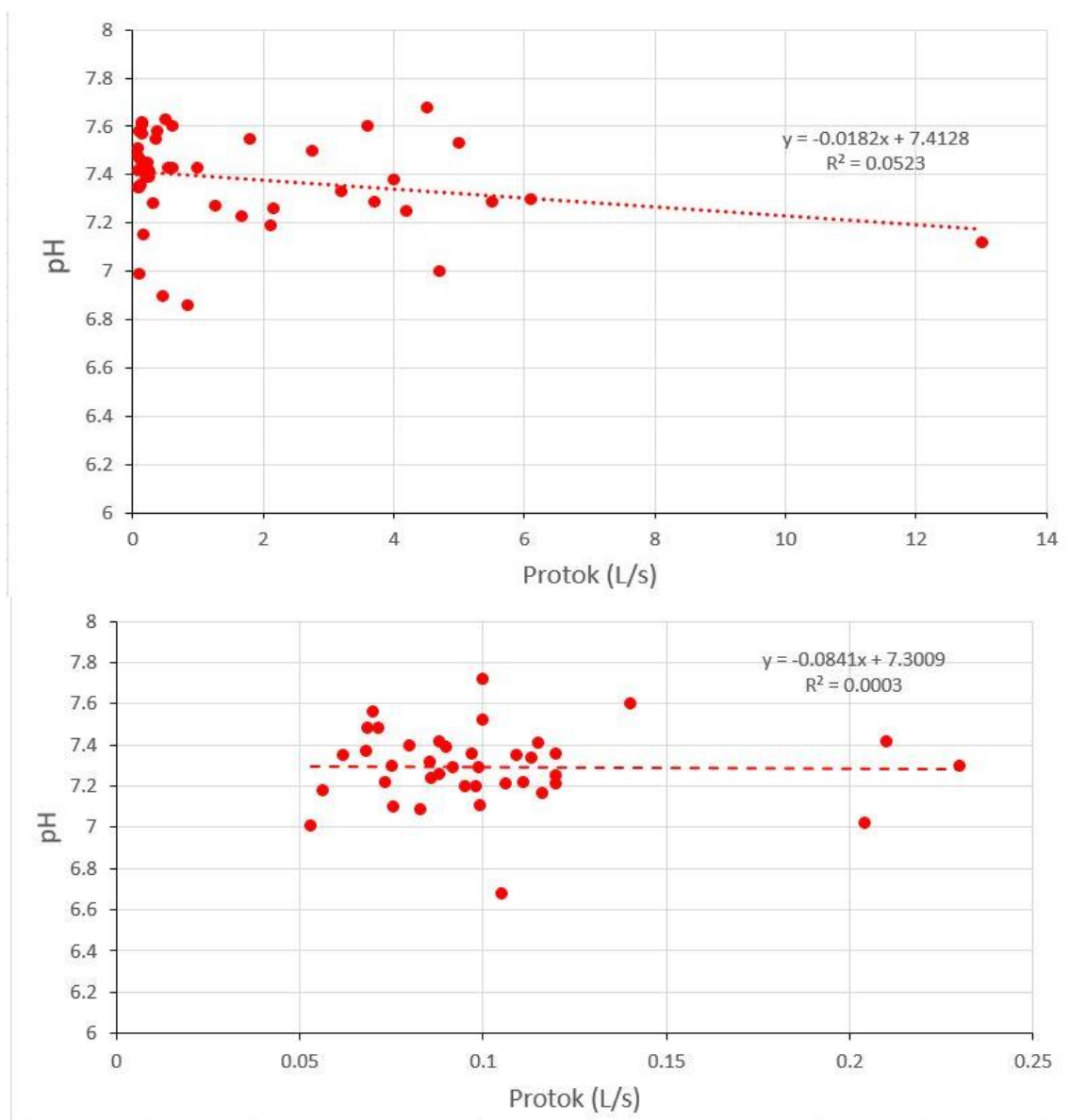
Izvor Kraljičin zdenac ima minimalnu zabilježenu vrijednost pH od 6,82, izmjerenu u veljači 2024. Maksimalna zabilježena vrijednost pH bila je u ožujku 2022. i iznosila je 7,74. Srednja vrijednost pH za Kraljičin zdenac iznosi 7,32 (Sl. 4.7.3.12).

Na Karlovom izvoru najniža zabilježena vrijednost pH od 6,76 zabilježena je u svibnju 2023. Najviša vrijednost bila je u ožujku 2022. kada je izmjeren pH od 7,78. Prosječna vrijednost pH Karlovog izvora iznosi 7,45 (Sl. 4.7.3.12).



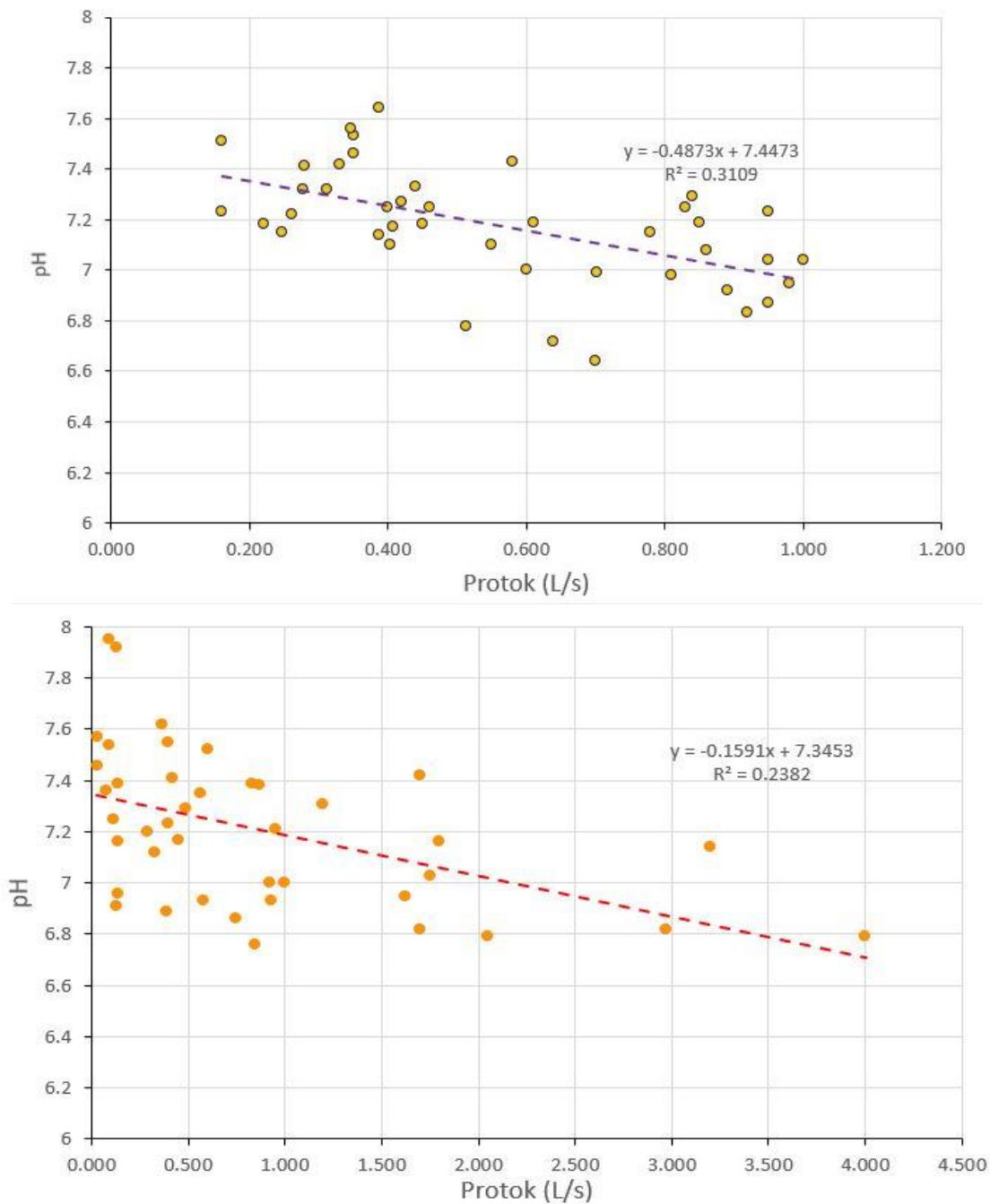
Sl. 4.7.3.12. Rasponi vrijednosti pH izvorske vode na praćenim izvorima u razdoblju od ožujka 2022. do veljače 2024.

Izmjerene vrijednosti pH stavljene su u odnos s izmjerenim protocima (izdašnosti) u trenutku mjerenja. U slučaju Jambrišakovog vrela uočen je blagi negativan trend vrijednosti pH, odnosno njezin pad s porastom protoka. To pokazuje i vrijednost koeficijenta korelacije ($r = -0,23$), koji pokazuje slabu negativnu vezu. U slučaju Malog Jambrišaka linija trenda pokazuje relativnu stagnaciju u vrijednostima pH, bez obzira na promjene u protoku (Sl. 4.7.3.13). Vrijednosti koeficijenta korelacije pokazuju gotovo nikakvu povezanost ($r = 0,02$). Vrijednosti R^2 vrlo su niske i u slučaju oba izvora, zbog toga odnos pH i protoka nije pouzdano analizirati linearnim odnosom (Sl. 4.7.3.13).



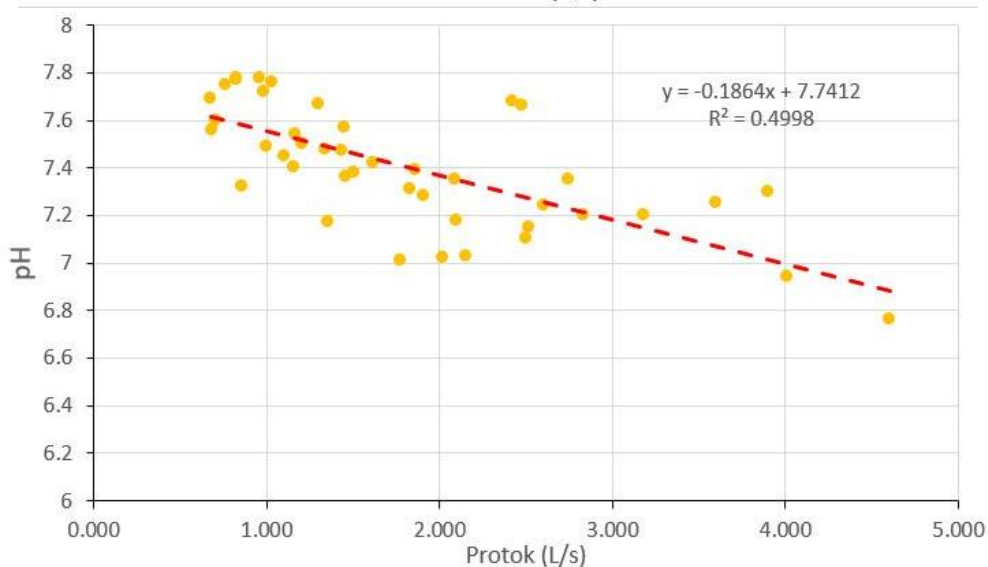
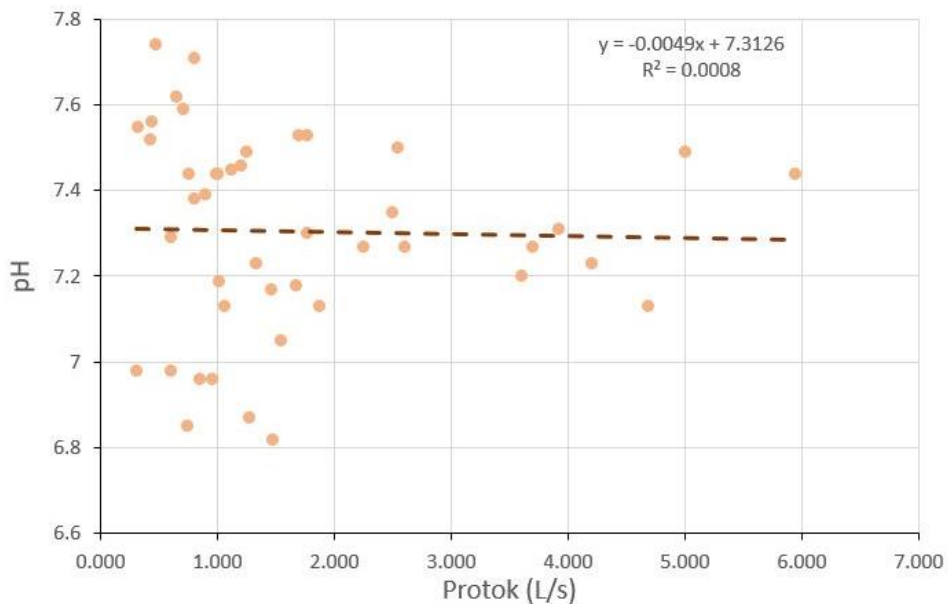
Sl. 4.7.3.13. Odnos izmjerenih vrijednosti pH izvorske vode i protoka na Jambrišakovom vrelu (gore) i Malom Jambrišaku (dolje)

Kod izvora Mali i Mini (Mali potok – potok Čnomerec) vidljiv je silazni trend, odnosno pad vrijednosti pH s porastom protoka (Sl. 4.7.3.14), što pokazuju i vrijednosti korelacije pH i protoka na tim dvama izvorima ($r = -0,57$ kod izvora Mali, $r = -0,50$ kod izvora Mini). Vrijednosti R^2 relativno je niska u slučaju izvora Mali ($R^2=0,3109$), a kao i u slučaju izvora Mini ($R^2=0,2382$), zbog toga linearni odnos pH i protoka treba analizirati s oprezom (Sl. 4.7.3.14).



Sl. 4.7.3.14. Odnos izmjerenih vrijednosti pH izvorske vode i protoka na izvoru Mali (gore) i izvoru Mini (dolje)

Izvor Kraljičin zdenac ima vrlo blagi silazni, gotovo stagnacijski trend vrijednosti pH s povećanjem protoka, a koeficijent korelacije pokazuje gotovo nikakvu povezanost ($r = 0,03$). Kod Karlovog izvora izražen je silazni trend vrijednosti pH porastom protoka (Sl. 4.7.3.15), a koeficijent korelacije pokazuje snažnu negativnu povezanost ($r = -0,72$). Vrijednosti R^2 također je vrlo niska u slučaju izvora Kraljičin zdenac ($R^2=0,008$), zbog čega odnos pH i protoka nije moguće prikazivati kao linearan. U slučaju Karlovog izvora vrijednost R^2 je umjerena ($R^2=0,4998$), zbog toga linearni odnos pH i protoka treba analizirati s oprezom (Sl. 4.7.3.15).



Sl. 4.7.3.15. Odnos izmjerenih vrijednosti pH izvorske vode i protoka na izvoru Kraljičin zdenac (gore) i Karlovom izvoru (dolje)

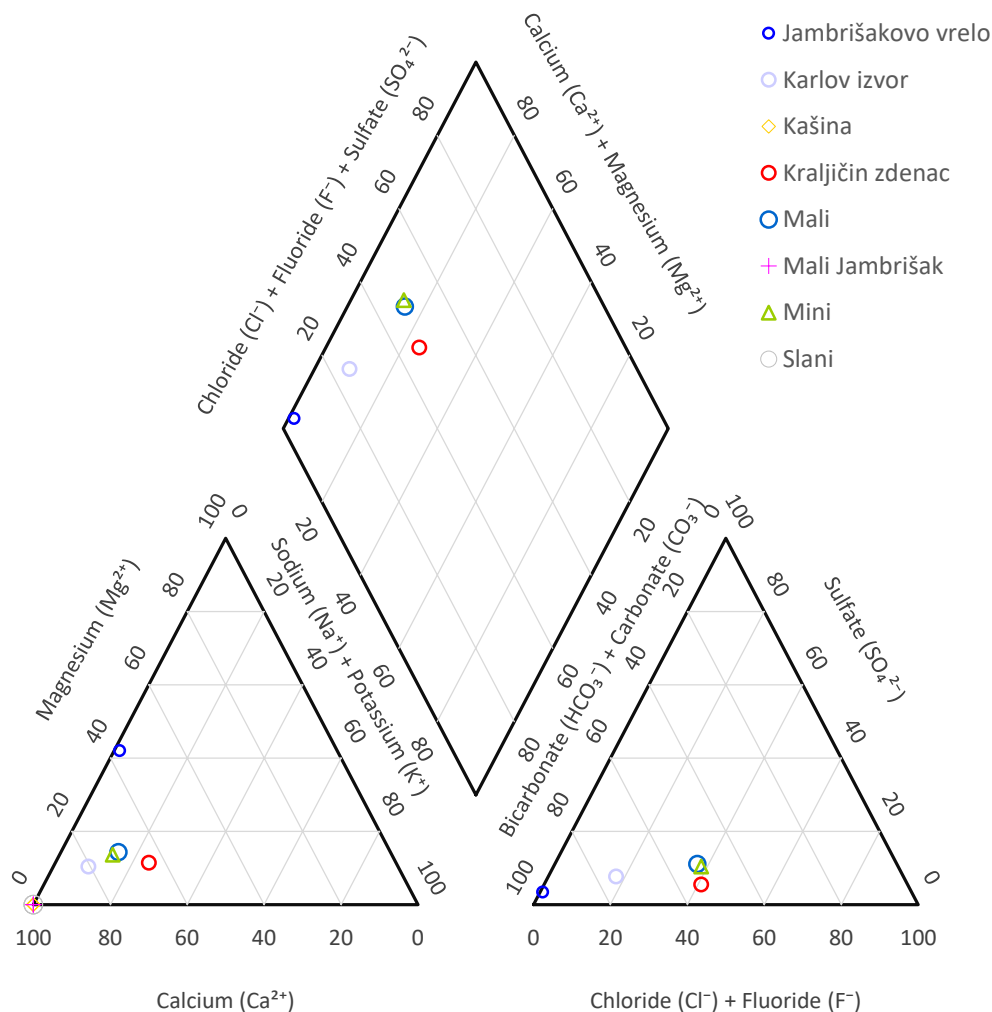
Hidrogeokemijski facijes praćenih izvora

Analizom kationa, aniona i karbonata te korištenjem Piperovog dijagrama (Piper, 1944), određeni su hidrogeokemijski facijesi, odnosno tipovi vode praćenih izvora. Uzorci su uzeti u studenom 2022., prilikom relativno suhih hidroloških uvjeta, zatim u travnju 2023., prilikom vrlo vlažnih uvjeta te u rujnu 2023., prilikom prosječnih hidroloških uvjeta. Iako se radilo o ljetu kada je obično razdoblje niskih voda, zbog vrlo vlažnog prvog dijela 2023. godine hidrološki uvjeti su bili prosječni. Treba napomenuti kako su izrađene i pojedinačne analize izvora nazvanog Kašina u travnju 2023. te izvora nazvanog Slani u rujnu 2023.

Prema analizi vode iz studenog 2022., izvori Jambrišakovo vrelo i Karlov izvor su kalcijsko-bikarbonatnog tipa (Tab. 4.7.3.1; Sl. 4.7.3.16; Piper, 1944; Clark, 2015). Jambrišakovo vrelo ima vrlo visoke udjele bikarbonatnih iona u usporedbi s drugim izvorima, kao i veće količine magnezijevih i kalcijevih iona. Izvori Mali, Mini i Kraljičin zdenac pripadaju istom tipu, međutim imaju granične vrijednosti prema mješovitom tipu izvora, odnosno kalcijsko-kloridnom tipu (Piper, 1944; Clark, 2015). Treba istaknuti i relativno visok udio natrijevih i kloridnih iona kod Kraljičinog zdenca.

Tab. 4.7.3.1. Ionski sastav izvorske vode pojedinih izvora u studenom 2022.

Studen 2022.	Fluorid (F ⁻) / mg/L	Klorid (Cl ⁻) / mg/L	Nitrit (NO ₂ ⁻) / mg/L	Nitrat (NO ₃ ⁻) / mg/L	Sulfat (SO ₄ ²⁻) / mg/L	Hidrogenkarbonat (HCO ₃ ⁻) / mg/L	Litij (Li ⁺) / mg/L	Natrij (Na ⁺) / mg/L	Amonij (NH ₄ ⁺) / mg/L	Kalij (K ⁺) / mg/L	Magnezij (Mg ²⁺) / mg/L	Kalcij (Ca ²⁺) / mg/L
ime izvora												
Mali	0,072	48,917		5,579	19,994	117,91	0,007	9,857	-	0,734	5,225	42,495
Mini	0,050	54,006		5,480	19,825	124,12	-	9,122	-	0,649	4,985	43,628
Karlov izvor	0,048	22,904		4,548	13,601	167,56	-	5,392	-	0,359	3,389	43,176
Kraljičin zdenac	0,042	74,143		3,708	18,533	167,56	-	21,624	-	0,338	5,461	50,278
Jambrišakovo vrelo	0,069	1,536		1,806	12,025	422,01	-	1,539	-	0,723	31,370	69,555

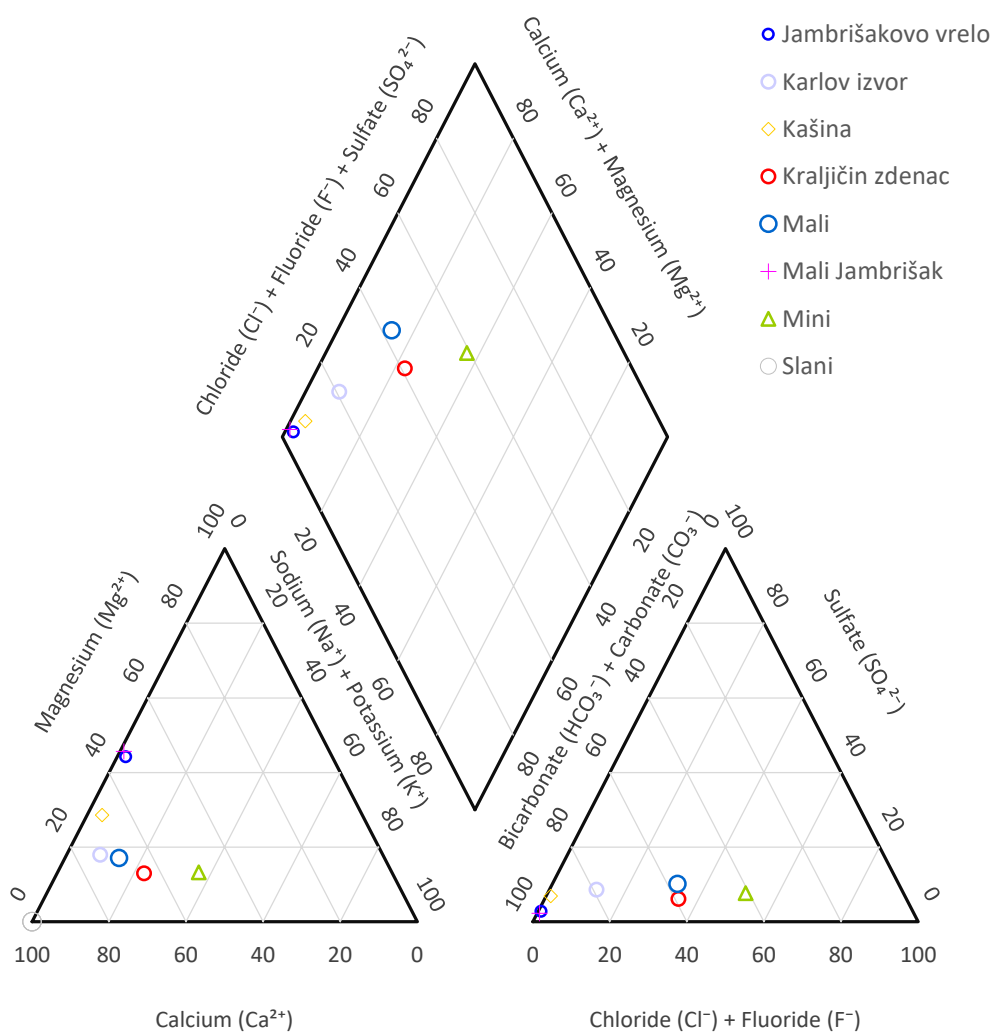


Sl. 4.7.3.16. Piperov dijagram analiziranih uzoraka izvorske vode u studenom 2022.

Analiza izvorske vode iz travnja 2023. pokazala je kako izvori Jambrišakovo vrelo, Mali Jambrišak, Karlov izvor i izvor Kašina pripadaju kalcijsko-bikarbonatnom hidrogeokemijskom tipu (Tab. 4.7.3.2; Sl. 4.7.3.17). Jambrišakovo vrelo i Mali Jambrišak imali su vrlo visoke udjele bikarbonatnih iona u usporedbi s drugim izvorima, kao i veće količine magnezijevih iona. Izvori Mali i Kraljičin zdenac pripadaju istom tipu, međutim imaju granične vrijednosti prema kalcijsko-kloridnom tipu (Piper, 1944; Clark, 2015), dok je izvor Mini ovdje pokazao karakteristike mješovitog tipa između kalcijsko-kloridnog i kalcijsko-karbonatnog tipa. Treba istaknuti i relativno visok udio natrijevih i kloridnih iona kod Kraljičinog zdenca i izvora Mini (Tab. 4.7.3.2).

Tab. 4.7.3.2. Ionski sastav izvorske vode pojedinih izvora u travnju 2023.

Travanj 2023..	Fluorid (F ⁻) / mg/L	Klorid (Cl ⁻) / mg/L	Nitrit (NO ₂ ⁻) / mg/L	Nitrat (NO ₃ ⁻) / mg/L	Sulfat (SO ₄ ²⁻) / mg/L	Hydrogenkarbonat (HCO ₃ ⁻) / mg/L	Litij (Li ⁺) / mg/L	Natrij (Na ⁺) / mg/L	Amonij (NH ₄ ⁺) / mg/L	Kalij (K ⁺) / mg/L	Magnezij (Mg ²⁺) / mg/L	Kalcij (Ca ²⁺) / mg/L
ime izvora												
Mali	0,035	38,270	-	4,762	16,122	116,362	-	7,389	-	0,569	4,943	32,809
Mini	0,095	67,849	-	4,213	13,671	93,089	-	31,184	-	0,777	6,034	37,689
Karlov izvor	0,102	13,052	-	4,429	12,540	147,391	-	5,682	-	0,716	4,030	44,667
Kraljičin zdenac	0,038	58,353	-	5,315	13,900	170,664	-	21,672	-	0,497	6,628	54,512
Jambrišakovo vrelo	0,087	1,389	-	3,092	6,851	310,298	-	2,294	-	0,761	28,170	56,208
Mali Jambrišak	0,181	1,280	-	1,474	7,321	403,387	-	1,202	0,070	0,721	39,348	75,758
Kašina	0,056	1,304	-	1,012	10,994	186,179	-	2,398	-	0,599	10,589	41,220

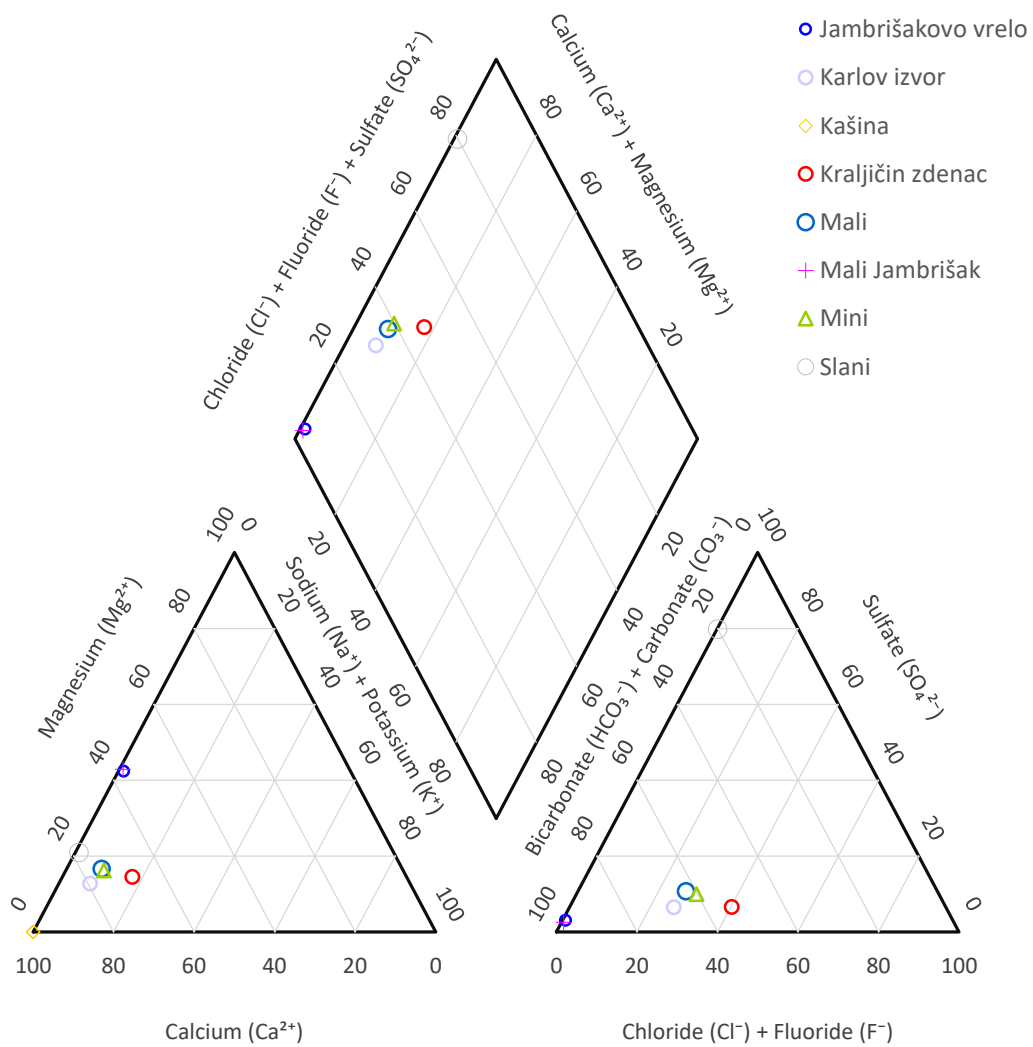


Sl. 4.7.3.17. Piperov dijagram analiziranih uzoraka izvorske vode u travnju 2023.

Analiza izvorske vode iz rujna 2023. pokazala je kako izvori Jambrišakovo vrelo, Mali Jambrišak, izvori Mini i Mali te Karlov izvor imaju kalcijско-bikarbonatni hidrogeokemijski tip (Tab. 4.7.3.3; Sl. 4.7.3.18). Izvor Kraljičin zdenac pripada istom tipu, međutim ima granične vrijednosti prema kalcijско-kloridnom tipu, odnosno mješovitom tipu. Izvor Slani razlikuje se od ostalih po ionskom sastavu i pripada kalcijско-sulfatnom tipu (Piper, 1944; Clark, 2015) uz vrlo visoke vrijednosti kalcijevih, magnezijevih i sulfatnih iona. Treba istaknuti i relativno visok udio natrijevih i kloridnih iona kod Kraljičinog zdenca (Tab. 4.7.3.3). Jambrišakovo vrelo i Mali Jambrišak imali su vrlo visoke udjele karbonatnih iona u usporedbi s drugim izvorima.

Tab. 4.7.3.3. Ionski sastav izvorske vode pojedinih izvora u rujnu 2023.

Rujan 2023. ime izvora	Fluorid (F ⁻) / mg/L	Klorid (Cl ⁻) / mg/L	Nitrit (NO ₂ ⁻) / mg/L	Nitrat (NO ₃ ⁻) / mg/L	Sulfat (SO ₄ ²⁻) / mg/L	Hidrogenkarbonat (HCO ₃ ⁻) / mg/L	Litij (Li ⁺) / mg/L	Natrij (Na ⁺) / mg/L	Amonij (NH ₄ ⁺) / mg/L	Kalij (K ⁺) / mg/L	Magnezij (Mg ²⁺) / mg/L	Kalcij (Ca ²⁺) / mg/L
Mali	0,054	33,228	-	5,624	18,122	133,413	0,003	6,061	-	0,915	6,695	49,116
Mini	0,068	38,284	-	4,805	17,485	133,413	-	6,278	-	0,632	6,007	45,425
Karlov izvor	0,066	37,711	-	4,801	12,935	169,798	-	6,435	-	0,449	5,790	59,364
Kraljičin zdenac	0,061	74,448	-	3,987	16,572	169,798	0,002	17,864	-	0,761	8,073	62,343
Jambrišakovo vrelo	0,098	1,660	-	1,968	10,633	424,495	-	1,466	-	0,744	32,643	71,517
Mali Jambrišak	0,138	1,103	0,058	0,960	8,982	430,559	-	0,998	0,022	0,672	33,744	73,008
Slani	0,256	1,569	-	0,306	1197,863	382,045	0,011	4,881	-	2,627	76,074	467,394



Sl. 4.7.3.18. Piperov dijagram analiziranih uzoraka izvorske vode u rujnu 2023.

5. Rasprava

5.1. Broj i gustoća izvora

Na istraživanom području pronađeno je višestruko više izvora nego što je to navedeno u službenim dokumentima Parka prirode Medvednice, koji se odnose na cijelo zaštićeno područje. Kartirano je ukupno 900 izvora, dok je službeni broj za cijeli Park oko 230 izvora (Plan upravljanja, 2009). Većina od navedenih 230 izvora vidljiva je na topografskoj karti 1:25 000 (DGU, 2024). Prosječna gustoća izvora za cijelo istraživano područje iznosi 10,53 izvora/km². Usporedimo li to s dostupnim brojem i gustoćom izvora koji su istraženi primjerice na području Parka prirode Žumberak – Samoborsko gorje vidljivo je kako je gustoća značajno veća na području Parka Prirode Medvednica. Naime, na području cijelog PP Žumberak – Samoborsko gorje kartirano je 847 izvora (Vujnović, 2011), što kada se podijeli s površinom Parka daje gustoću od 2,48 izvora/km².

Gustoća izvora u drugim dijelovima svijeta, pema dostupnim istraživanjima, također je raznolika. Rezultati variraju od 5 do 38 izvora/km². Razlike u rezultatima iz dostupnih radova, osim o hidrogeološkim obilježjima, ponajviše ovise o definiranju prostora istraživanja te detaljnosti istraživanja. Neka istraživanja zahvaćaju cijele planine, dok se neki radovi bave samo izvorima u najvišim predjelima. Najveći broj istraživanja izvora u Europi provodi se u Poljskoj, gdje je na području gornjeg dijela poriječja rijeke Wolosatka u na području Nacionalnog parka Bieszczady gustoća izvora 12 izvora/km² (Rzonca i dr., 2008), dok je primjerice na masivu Polonina Wetlinska, na visinama većim od 900 metara, gustoća izvora iznosila 38 izvora/km² (Lasek i dr., 2012). Na poriječju rijeke Bystrzyca Dusznicka, na području Sudeta, gustoća izvora bila je oko 7 izvora/km² (Buczinsky i Rzonca, 2011) te oko 7.7 izvora/km² na poriječju rijeke Muszynka u Karpatima (Buczinsky i Rzonca, 2018). U Italiji, na području sjevernih Apenina gustoća izvora iznosila je 3,3 izvora/km², na istraživanom području od 68 km² (Corsini, 2009). U Turskoj, u istraživanu provedenom na području planina Sultan, korišteni su podaci o izvorima s topografske karte 1:25 000, te je gustoća tih izvora na području od 378 km² iznosila otprilike 1,2 izvora/km² (Ozdemir, 2011). Ako se na istraživanje u Turskoj primijene omjeri broja kartiranih izvora iz ovog istraživanja s onima dostupnima na topografskoj karti mjerila 1:25 000 (otprilike 9:1), dobit će se vrlo sličan broj gustoće izvora kao i na Medvednici. Na području kristalinskog masiva Morais, na sjeveru Portugala, istraženo je oko 1500 izvora na području od 650 km², čime gustoća iznosi oko 2,3 izvora/km² (Pacheco i Alencao, 2002).

Na većim, regionalnim i državnim razinama gustoće izvora su manje. Primjerice, od svih saveznih država SAD-a, Oregon ima najveću gustoću izvora, a ona iznosi 0,12 izvora/km² (Freed i dr., 2019), dok u primjerice relativno suhoj Nevadi iznosi 0,1 izvor/km² (Abele, 2011). Prema opisanom, gustoća izvora značajno ovisi o veličini promatranog područja, kao i o mnogim ostalim obilježjima prostora istraživanja, kao što su hidrogeološka obilježja, klimatski uvjeti i reljefna obilježja prostora. Također, u određenim istraživanjima izvori vrlo male izdašnosti ponekad su zanemareni (npr. Corsini, 2009). Zbog raznolikosti u navedenim obilježjima prostora istraživanja, teško je uspoređivati broj i gustoću izvora na Medvednici s prethodno opisanim rezultatima. Međutim, može se primijetiti kako gustoća izvora istraživanog područja odgovara rasponima gustoća u spomenutim istraživanim planinskim dijelovima južne Poljske.

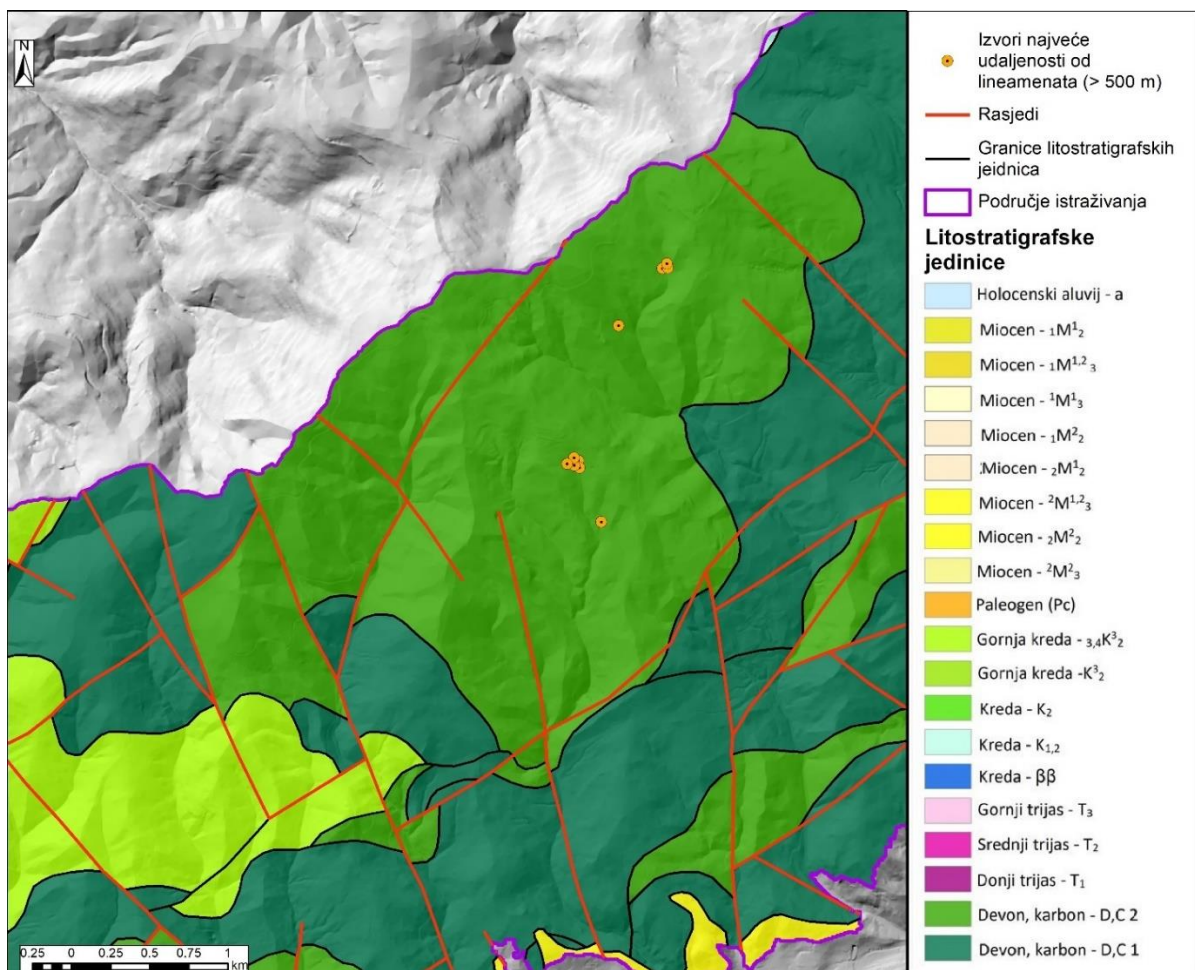
Na istraživanom području uočeno je kako su najmanje gustoće izvora u nižim, rubnim područjima, prema gradu Zagrebu, te na jugozapadnom dijelu istraživanog područja. Treba napomenuti kako na rezultate utječe i određivanje granica istraživanog područja, odnosno u ovom slučaju Parka prirode Medvednica. Izvori naravno postoje i izvan granica istraživanog područja, pogotovo u podsljemenskim naseljima kao što su Gračani. Kada bi se i oni uzeli u obzir gustoća izvora bila bi vjerojatno nešto viša. Druga stvar koju je potrebno napomenuti jest kako se brojni zahvaćeni i izdašniji izvori nalaze upravo na područjima uz podsljemenska naselja, što je uvjetovano hidrogeološkim i reljefnim obilježjima. Opis pojedinačnih prostornih obilježja u međuodnosu s brojem, gustoćom i izdašnošću izvora slijedi u idućim poglavljima. Što se tiče jugozapadnog dijela, već je spomenuto kako se radi o krškom prostoru na kojem je izraženije podzemno otjecanje, zbog čega je i broj izvora manji.

5.2. Utjecaj geoloških obilježja na pojavnost izvora

Rezultati su pokazali kako prostorni raspored izvora pokazuje povezanost s geološkim obilježjima istraživanog prostora. Geološka, točnije hidrogeološka obilježja prostora najčešće se spominju kao ključan čimbenik oblikovanja i pojave izvora, posebno kada se govori o rasjedima i litološkim kontaktnim zonama (Rzonca i dr., 2008; Corsini i dr., 2009; Buczynski i Rzonca 2011; 2018; Mostowik i dr., 2016). Analiza povezanosti pojavnosti izvora i rasjeda, ali i kontaktnih zona pokazala je kako se broj izvora povećava s blizinom rasjeda i kontakata različitih litostratigrafskih jedinica. Na do 100 metara udaljenosti od rasjeda nalazi se 33 % izvora, što je sukladno istraživanju u Poljskoj, na

području Nacionalnog parka Bieszczady gdje se 30 % izvora nalazi do 100 metara udaljenosti od rasjeda (Lasek i dr., 2012).

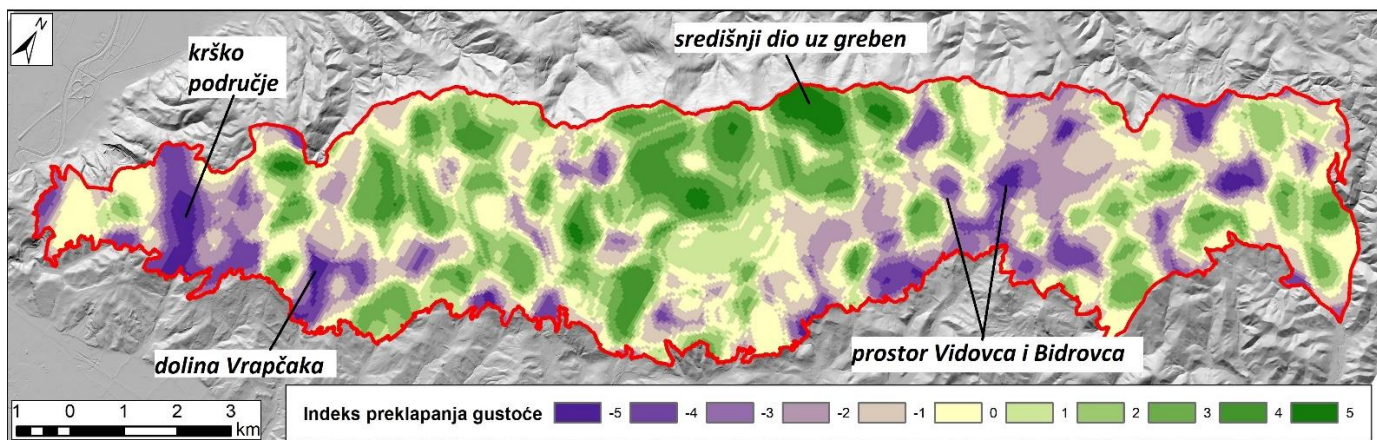
Ipak, odnosi nisu posve jednostavni. Analiza udaljenosti izvora od rasjeda pokazala je kako se s porastom udaljenosti gustoća smanjuje (s 11,96 izvora/km² do 7,33 izvora/km²), no samo do udaljenosti od 400 metara od rasjeda. S daljnjim povećanjem udaljenosti zabilježen je relativni porast gustoće izvora, čak i do vrijednosti od 26 izvora/km². Slični rezultati dobiveni su i analizom gustoće izvora na udaljenosti od lineamenata (rasjeda i kontakata litostratigrafskih jedinica zajedno). Ondje je također zabilježen pad gustoće s povećanjem udaljenosti s 11,11 izvora/km² na 7,25 izvora/km², samo do udaljenosti do 400 metara. S daljnjim rastom udaljenosti od lineamenata slijedi rast do udaljenosti od 500-600 metara gdje je izračunata gustoća od 11,74 izvora/km². Razlozi za to mogu biti različiti, međutim najvjerojatnije leže u vrsti i stupnju poopćavanja geoloških podataka. Prvi problem vjerojatno je taj što je mjerilo dostupnih geoloških karata 1:100 000. Geološki vodič Medvednice (Šikić, 1995) pruža nešto preciznije podatke, posebno što se tiče rasjeda, međutim i karta vodiča rađena je u istom mjerilu, na temelju OGK. Zbog toga neki manji rasjedi i kontakti nisu ucrtani na karti. Osim mjerila i preciznosti podataka, problem vjerojatno leži i u vrsti prikaza geoloških podataka. Naime karta je izrađena na način da prikazuje različite litostratigrafske jedinice, prvenstveno na temelju njihove starosti. Unutar svake litostratigrafske jedinice opisane su različite vrste stijena čije potencijalne litološke cjeline nisu kartografski izdvojene. Ako izdvojimo izvore s udaljenosti od 500 do 600 metara od lineamenata, gdje je zabilježena njihova najveća gustoća vidljivo je kako se većina njih (10 od 13) nalazi na središnjem dijelu istraživanog područja, unutar litostratigrafske jedinice ortometamorfita devonske i karbonske starosti (Sl. 5.2.1). Kada se analiziraju rasjedne linije u okruženju vidljivo je kako je dio njih nedovršen, što može ukazivati na nedostatak podataka, odnosno izostanak evidentiranja pojedinih rasjeda na karti. Osim navedenog, u obzir treba uzeti i činjenicu da je na udaljenostima većim od 500 metara od lineamenata pronađeno tek 13 od ukupno 900 izvora. Također, područja s udaljenostima većim od 500 metara od lineamenata su relativno mala, zbog čega izračunate gustoće treba uzeti s oprezom.



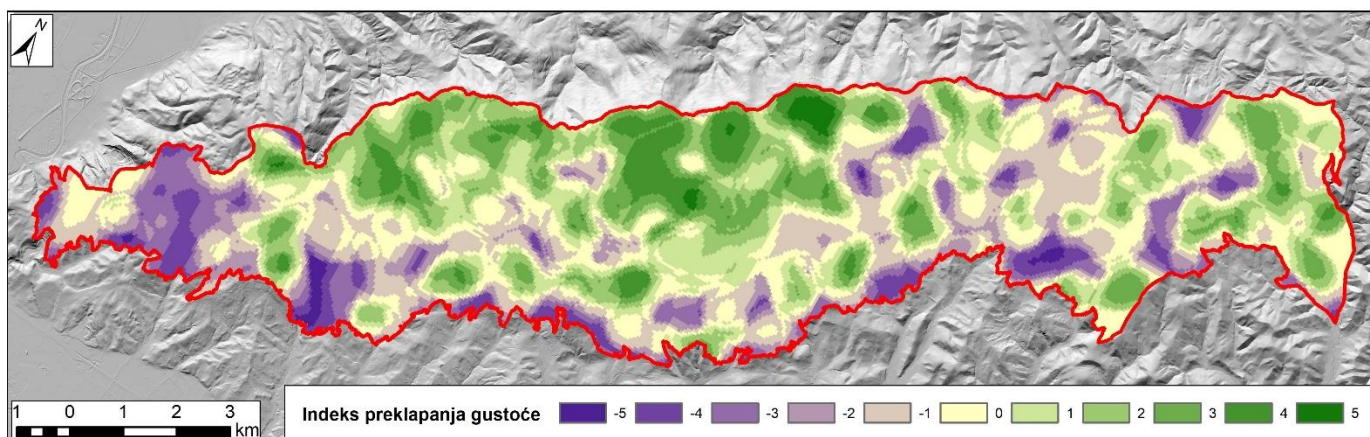
Sl. 5.2.1. Položaj najudaljenijih izvora od lineamenata

Izvor: Podloga izrađena prema: Šikić i dr., 1977; Basch, 1981; Šikić, 1995

Drugačiji pristup analizi povezanosti izvora i rasjeda te granica litostratigrafskih jedinica bio je preklapanjem njihovih gustoća. Analize preklapanja gustoće izvora s gustoćom rasjeda i lineamenata dale su slične rezultate. Većina istraživanog područja ima dobro, vrlo dobro ili potpuno poklapanje gustoća izvora s gustoćama rasjeda (vrijednosti indeksa od -2 do 2), odnosno gustoćama svih geoloških lineamenata (69,56 % u slučaju rasjeda i 72 % u slučaju lineamenata; Tab 4.3.2.3; Tab. 4.3.2.4). Potpuno nepoklapanje i loše poklapanje (vrijednosti -5, -4, 4 i 5) ima 13,47 % područja u slučaju preklapanja izvora i rasjeda, odnosno 10,62 % istraživanog područja u slučaju preklapanja izvora i lineamenata (Tab 4.3.2.3; Tab. 4.3.2.4). Prostorno gledano, rezultati su slični u obje analize (Sl. 5.2.2; Sl. 5.2.3).



Sl. 5.2.2. Indeks preklapanja razreda gustoće izvora s razredima gustoće rasjeda

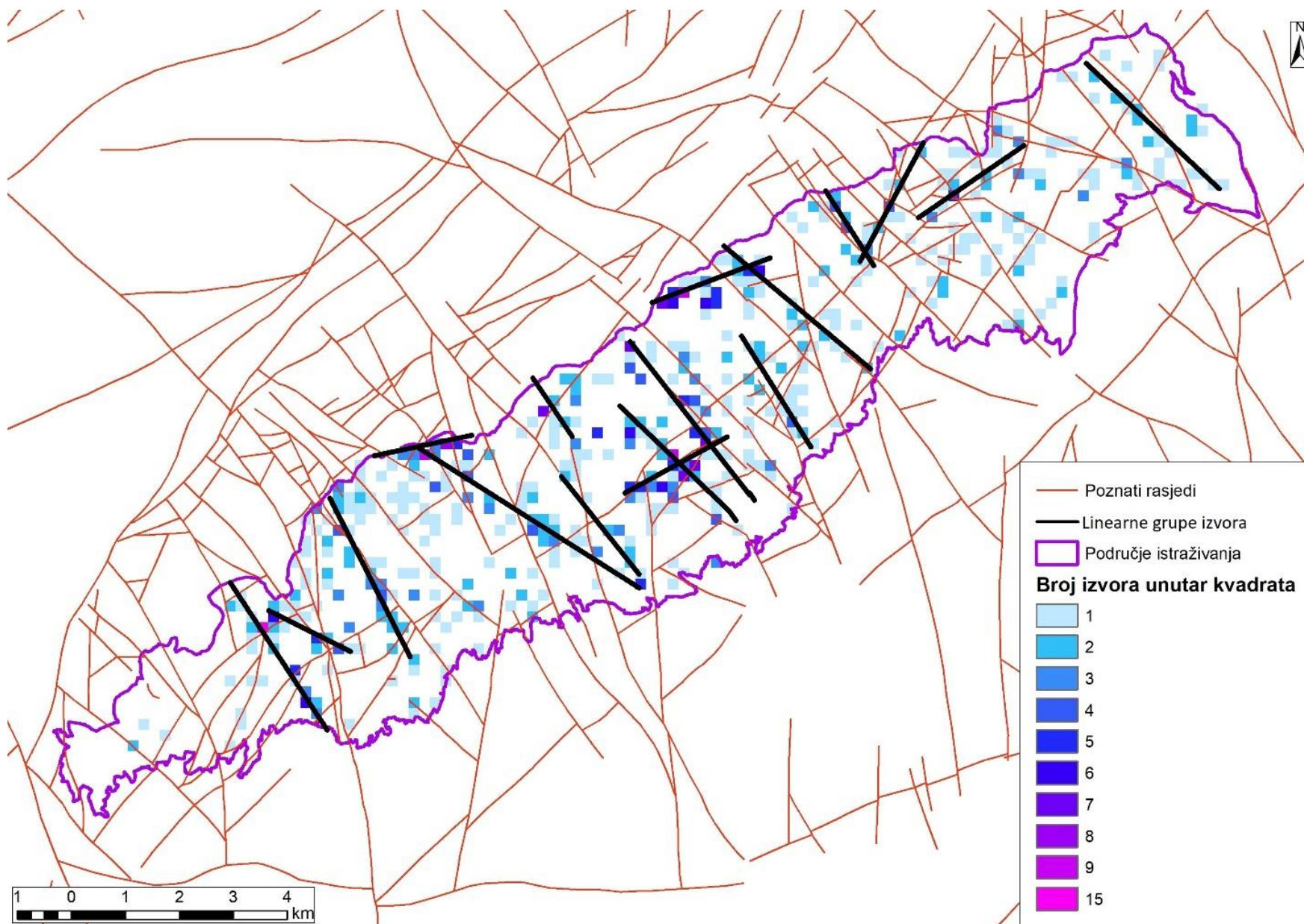


Sl. 5.2.3. Indeks preklapanja razreda gustoće izvora s razredima gustoće lineamenata (rasjedi i granice litostratigrafskih jedinica)

Dijelovi istraživnog područja s lošim poklapanjem i potpunim nepoklapanjem gustoća izvora s gustoćama rasjeda i lineamenata (vrijednosti 4, 5, -4 i -5) imaju prostori na jugozapadnom dijelu istraživnog područja, u središnjem dijelu na višim predjelima (uz greben Medvednice) te pojedini manji dijelovi na sjeveroistočnom dijelu istraživnog područja. Jugozapadni dio Medvednice gdje su zabilježena nepoklapanja gustoća pretežito je krškog i fluviokrškog reljefa, gdje predvladava podzemno otjecanje, zbog čega ne postoji dobro razvijeno površinsko otjecanje te je prisutan i manji broj izvora. Također, u donjem dijelu doline Vrapčaka ucrtana su dva paralelna rasjeda, te se na tom dijelu susreće nekoliko litostratigrafskih jedinica (Sl. 4.3.2.1). Zbog svega navedenog su na tom dijelu prisutne negativne vrijednosti indeksa gustoće (-4 i -5) koje kazuju na veliku gustoću rasjeda i lineamenata te vrlo malu gustoću izvora. Suprotno tome, središnji prostor Medvednice, podno grebena,

ima visoke vrijednosti gustoće izvora, a relativno male vrijednosti gustoće rasjeda. Sukladno tome, vrijednosti indeksa preklapanja gustoća su visoke (4 i 5). Rezultate vjerojatno možemo povezati s ranije spomenutim nedovoljno preciznim geološkim podacima, točnije neucrtanim rasjedima te nepostojanjem litoloških granica na karti (Sl. 4.3.2.1; Sl. 5.2.1). Na sjeveroistočnom dijelu, na manjim i/ili većim izoliranim područjima (ovisno o korištenoj metodi) pronađene su vrlo niske vrijednosti indeksa (-4 i -5; Sl. 5.2.2 i Sl. 5.2.3). Dio njih vezan je uz manji prostor između potoka Vidovec i Bidrovec, gdje je prisutan (fluvio)krški reljef. Jedan od razloga nepoklapanja na pojedinim područjima s vrlo niskim indeksom (-4, -5) je i taj što nije nužno da se uz sve rasjede i rasjedne zone javljaju izvori. Pojava rasjeda nije jedini uvjet za pojavu izvora. Ostali čimbenici, prvenstveno (hidro)geološki (npr. nagib slojeva), a nakon njih i geomorfološki (npr. nagib padina) i klimatski (npr. količina i vrsta padalina) imaju utjecaj na njihovu pojavu (Rzonca i dr., 2008; Corsini i dr., 2009; Buczynski i Rzonca 2011; 2018; Kløve i dr., 2014; Martinić i Čanjevac, 2024). Također, uz sve navedeno, uvijek je moguće da određeni izvori nisu kartirani, zbog čega se gustoće ne poklapaju na određenim lokacijama.

Rasjedi također imaju i utjecaja na pojavu izvora u obliku linearnih skupina koje se pružaju paralelno s rasjedima, odnosno duž njih (Rzonca i dr., 2008; Mocior i dr., 2015; Buczinky i Rzonca, 2018). Temeljem te pretpostavke, područje istraživanja podijeljeno je na kvadrate veličine 200 m x 200 m, te su unutar svakog kvadrata izbrojani izvori. Rezultat je mreža kvadrata s brojem izvora unutar kvadrata, koji varira od 0 do 9 izvora, s iznimkom jednog kvadrata s 15 izvora. Na temelju dobivene karte vizualno su povezani linearni nizovi kvadrata, s prednošću onih s većim brojem izvora (Sl. 5.2.4.). Nakon toga, dobiveni rezultati kartografski su preklopljeni s rasjedima na istraživanom području (Sl. 5.2.4). Većina ucrtanih linearnih grupa izvora pružanja su sjeverozapad – jugoistok, što se poklapa s pružanjem rasjeda poprečnih na smjer pružanja grebena Medvednice. Na karti je vidljivo kako se pojedine ucrtane linije izvorišnih grupa vrlo dobro podudaraju s ucrtanim rasjedima ili pak nastavljaju prekinute linije rasjeda (Sl. 5.2.4). Takvi rezultati u skladu su s onima dobivenim istraživanjem na području masiva Polonina Wetlinska u Poljskoj (Mocior i dr., 2015), gdje je istom metodom utvrđena podudarnost poprečnih rasjeda s linearnim grupama izvora.



Sl. 5.2.4. Linearne grupe izvora u odnosu na rasjede
 Izvor: OGK 1:100 000, Listovi Zagreb i Ivanić Grad (Šikić i dr., 1977; Šikić, 1995)

Osim utjecaja rasjeda i granica litostratigrafskih jedinica, različitost u litostratigrafiji istraživanog područja, odnosno hidrogeološkim obilježjima litostratigrafskih jedinica također ima utjecaj na broj i gustoću izvora. Najveći broj izvora (52,85 %) nalazi se na području parametamornih stijena devonske i karbonske starosti (D,C 1), odnosno na području građenom većinom od škriljavaca, grauvaka, silita i mramora. Bez obzira na to što iste stijene zauzimaju najveću površinu od svih litostratigrafskih jedinica, na području parametamornih stijena zabilježena je i iznadprosječna gustoća izvora, točnije 13,76 izvora/km² (Tab. 4.3.1.1). Podsjetimo, u slučaju parametamornih stijena radi se o stijenama s raznolikom propusnošću, od gotovo nikakve do osrednje propusnosti (Brkić i Čakarun, 1998a; 1998b; Slišković i Šarin, 1999a; 1999b; Sl.4.3.1.2). Novija istraživanja dokazuju da se na području Medvednice trošenjem kristalinskih stijena mogu povećati njihova poroznost i propusnost, što bi objasnilo povećani broj i gustoću izvora na području parametamornih stijena (Briški i dr., 2020).

Velik broj i gustoća izvora zabilježeni su na područjima litostratigrafskih jedinica gornje krede (konglomerati, breče, vapnenci - $_{3,4}K^3_2$) i srednjeg trijasa (dolomiti - T₂) te devonskih i karbonskih ortometamorfita (većinom škriljavci - D,C 2). Gornjokredne naslage imaju međuzrnsku i pukotinsku poroznost te su pretežno nepropusne. Manji, plitki vodonosnici mogu se pojaviti s izvorima vrlo slabe izdašnosti, što je potvrđeno analizama izdašnosti prema litostratigrafskim jedinicama (Sl. 4.3.3.1). Dakle radi se o većem broju izvora vrlo slabe izdašnosti. Nasuprot njih imamo karbonatne stijene srednjeg trijasa koje su slabo propusne, ali imaju pukotinsko-kavernozno poroznost. Na tom prostoru prisutan je krški reljef te su izvori relativno veće izdašnosti, (Sl. 4.3.3.1) pa su grupirani na manjem prostoru (Martinić i Čanjevac, 2024). Ortometamorfiti (D,C 2) su područja s pukotinskom poroznošću i plitkom propusnošću, gdje postoje manji, ograničeni vodonosnici, ali je izdašnost izvora slabija (Brkić i Čakarun, 1998a; 1998b). Ako u obzir uzmemo već spomenuta istraživanja povećane poroznosti i propusnosti metamornih stijena uslijed trošenja (Briški i dr., 2020), možemo pretpostaviti da je to uzrok relativno veće gustoće izvora na ortometamornim stijenama nego što je očekivano.

Najveća gustoća izvora zabilježena je na području litostratigrafskih jedinica paleogenskih konglomerata i pješčenjaka (Pc) te iznosi 24,94 izvora/km². Iako je njihova površina vrlo mala (0,28 km²), kao i broj izvora (7), a hidrogeološka obilježja ukazuju na slabu propusnost te međuzrnsku i pukotinsku poroznost, ovakav rezultat podudara se s istraživanjem na području poriječja rijeke Kryniczanka u poljskim Beskidima. Ondje je na cijelom istraživanom području gustoća izvora varirala od 4,8 do 50 izvora/km², a na području sastavljenom od konglomerata i duboko uslojenih pješčenjaka,

gustoća je bila najveća (Ciężkowski i dr., 2001 prema Buczinsky i Rzonca, 2018). Najmanja gustoća izvora na Medvednici (od litostratigrafskih jedinica koje su imale barem 1 izvor) zabilježena je na području gornjotrijaskih karbonata, te je iznosila samo 1,16 izvora/km² (Tab. 4.3.1.1).

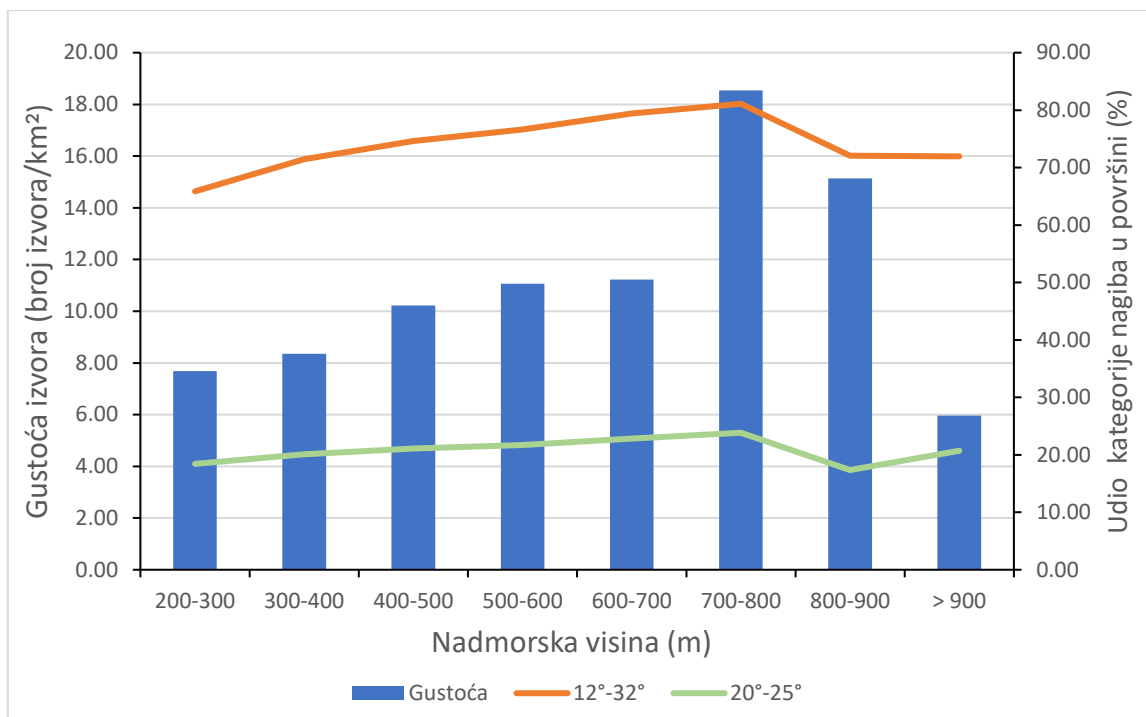
Dobivene rezultate gustoće i broja izvora prema litostratigrafskim jedinicama možemo usporediti s istraživanjem broja i gustoće izvora na području Parka prirode Žumberak – Samoborsko gorje (Vujnović, 2011). Iako su prostorno relativno blizu te su prema geološkoj karti sastavljeni od litostratigrafskih jedinica istih oznaka, Žumberak i Samoborsko gorje razlikuju se od Medvednice po svojim geološkim obilježjima. Na području Žumberka i Samoborskog gorja prevladavaju mezozojske karbonatne stijene izraženije poroznosti na kojima je razvijen krški i fluviokrški reljef (Šikić i dr, 1977; Bočić i Buzjak, 1998; Buzjak, 2011; Vujnović, 2011). Najveći broj izvora na području Žumberka i Samoborskog gorja pronađen je na područjima kredne starosti gdje prevladava fliš, potom na području gornjotrijaskih karbonata te krednih karbonatnih stijena. Prema dostupnim rezultatima, gustoće izvora općenito su manje na području PP Žumberak – Samoborsko gorje nego što je to u slučaju Medvednice. Najveća gustoća izvora na području Žumberka i Samoborskog gorja je na području donjotrijaskih karbonata, 10,8 izvora/km² te na području permskih i trijaskih pješčenjaka, 6,45 izvora/km² (Vujnović, 2011). Zanimljivo je usporediti gustoće i broj izvora na prostoru litostratigrafskih jedinica srednjeg trijasa, gdje je na području Žumberka i Samoborskog gorja pronađeno 37 izvora, s gustoćom od 2,35 izvora/km², a na području Medvednice 23 izvora, ali s gustoćom od 13,49 izvora/km². Na području litostratigrafskih jedinica gornjeg trijasa na području Žumberka i Samoborskog gorja kartirano je 287 izvora s malom gustoćom od 1,84 izvora/km², dok su na Medvednici kartirana samo 3 izvora, s već spomenutom gustoćom od samo 1,16 izvora/km² (Tab. 4.3.1.1). Moguće je da su stijene iste starosti i sastava prema litostratirafskim jedinicama prošle različite procese u svojoj prošlosti na lokalnim razinama, čime su njihova hidrogeološka obilježja različita (Šikić i dr., 1979).

5.3. Povezanost morfometrijskih obilježja i pojavnosti izvora

Spomenuto je kako su i geomorfološka obilježja i procesi povezani s izvorima. Pojedini geomorfološki procesi nisu nužno ključni za nastanak izvora, međutim rezultati su pokazali kako postoji veza između određenih reljefnih (morfometrijskih) obilježja i lokacije izvora. Hipsometrijska analiza pokazala je kako se izvori nalaze u svim razredima nadmorskih visina, što je sukladno drugim istraživanjima u

svijetu i Hrvatskoj (Vujnović, 2011; Mocior i dr., 2015; Stevens i dr., 2020). Najveći broj izvora na istraživanom području nalazi se na relativno nižim nadmorskim visinama, posebno u visinskom rasponu od 300 do 500 metara (gotovo 47 % ukupnog broja izvora). Međutim, gustoća izvora raste s porastom nadmorske visine, sve do visinskog razreda od 700 do 800 metara, gdje je ona najveća (18,54 izvora/km²), nakon čega gustoća pada (Tab. 4.4.1.1; Sl. 4.4.1.2) Razlozi takve pojavnosti mogu biti različiti i vjerojatno su rezultat različitih čimbenika. Jedni od utvrđenih su nagib padina i vertikalna raščlanjenost reljefa.

Prostorni raspored izvora prema nagibu padina pokazao je određene pravilnosti. Iako su izvori pronađeni na različitim padinama, s nagibima od 0,65° do 44,86°, najveći broj izvora (84,44 % ukupnog broja) i najveća gustoća izvora (11,96 izvora/km²) nalaze se na padinama nagiba između 12 i 32° (Sl. 4.4.2.2; Sl. 4.4.2.3; Tab. 4.4.2.1). Iako je taj razred nagiba padina relativno velikog raspona, rezultati se slažu s drugim istraživanjima (Ozdemir, 2011; Moghaddam i dr., 2015). Na takvom jako nagnutom terenu prisutna je snažna erozija, spiranje i izrazito kretanje masa (Lozić, 1996). Kada se nagibi padina podijele na manje razrede intervala od po 5°, vidljivo je kako se najveći broj izvora (gotovo 27 %) nalazi na padinama nagiba između 20° i 25°, te broj izvora postupno pada s povećanjem odnosno smanjenjem nagiba od tog razreda (Sl. 4.4.2.5). Takvi rezultati ne poklapaju se potpuno s istraživanjem izvora u Turskoj (Ozdemir, 2011), gdje je najveći broj izvora pronađen na nešto blažim nagibima, između 15° i 20° (32 %), te potom na nagibima između 10° i 15° (29 %) te 20° i 25° (20 %). Razlika u dobivenim rezultatima može biti posljedica različite rezolucije korištenog digitalnog modela reljefa (5 x 5 m nasuprot 20 x 20 m), te u preciznosti i upotpunjenosti baze podataka izvora.



Sl. 5.3.1. Gustoća izvora hipsometrijskih razreda i udio nagiba padina s najvećom gustoćom izvora prema hipsometrijskim razredima

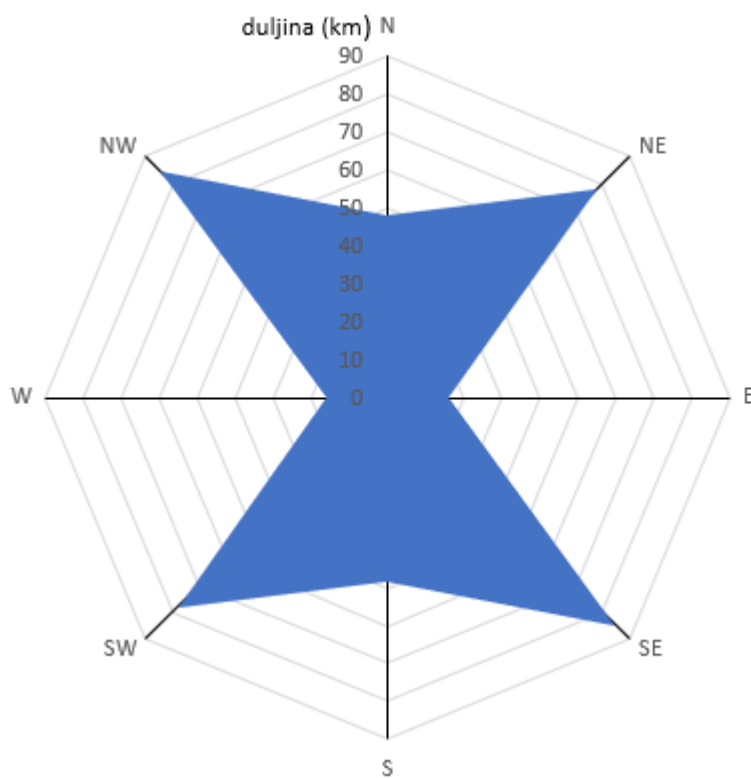
Usporedimo li promjenu gustoće izvora s promjenom nadmorske visine s kretanjem udjela nagiba padina unutar istih kategorija razjasnit će se promjena gustoće izvora po hipsometrijskim razredima. Promjene u udjelu izvorima najzastupljenijih razreda nagiba padina (12°- 32°, točnije 20-25°) prate promjenu u gustoći izvora po hipsometrijskim razredima, odnosno obje vrijednosti rastu od najnižih nadmorskih visina sve do visinskog razreda od 700 do 800 metara, gdje je zabilježena najveća gustoća izvora te najveći udio kategorija nagiba padina s najvećim brojem i gustoćom izvora (Sl. 5.3.1). Vrijednosti udjela nagiba padina od 12° do 32° po hipsometrijskim razredima te gustoća izvora u istima pokazali su snažnu pozitivnu korelaciju u vrijednosti od 0,64.

Nagibi padina prostora povezani su s vertikalnom raščlanjenosti reljefa (Lozić, 1996). Rezultati analize izvora u odnosu na vertikalnu raščlanjenost prostora također su pokazali određene pravilnosti. Najveći broj izvora (31 %) pronađen je na prostorima vertikalne raščlanjenosti od 250 do 300 m/km². Prostori s tom vertikalnom raščlanjenosti imaju i najveću gustoću izvora, 13,05 izvora/km² (Tab. 4.4.3.1; Sl. 4.4.3.1; Sl. 4.4.3.2). Broj i gustoća izvora s udaljavanjem od vrijednosti vertikalne raščlanjenosti 250-300 postupno padaju, s izuzetkom područja s vertikalnom raščlanjenosti između 100 i 150 m/km², gdje je zabilježena veća gustoća nego u razredu s vrijednostima od 150 do 200 m/km²

(Tab. 4.4.3.1; Sl. 4.4.3.1; Sl. 4.4.3.2.). Rezultati analize relativne vertikalne raščlanjenosti pokazali su kako je se najveći broj i gustoća izvora nalaze na prostorima s vrijednostima od -20 do 20 m/km² (Tab. 4.4.3.2; Sl. 4.4.3.4.; Sl. 4.4.3.5). Također, na područjima s izraženijom akumulacijom materijala, odnosno negativnom vertikalnom raščlanjenosti zabilježene su vrijednosti ispod prosječne gustoće izvora i njihov relativno manji broj. Sukladno tome, na područjima pojačane denudacije u svim razredima zabilježene su iznadprosječne gustoće, iako je zabilježen relativni pad s porastom vrijednosti (Tab. 4.4.3.2; Sl. 4.4.3.4; Sl. 4.4.3.5). Iako je općenito prostor Medvednice relativno vrlo raščlanjen u odnosu na okolicu (Sl. 4.4.3.3), iz rezultata je vidljivo kako se izvori više pojavljuju na područjima pojačanog trošenja, što je sukladno i nekim drugim istraživanjima (npr. Pacheco i Alenção, 2002; Mocior i dr. 2015). Ako rezultate povežemo s nagibom padina, visoke vrijednosti gustoće na područjima pojačane denudacije mogu se objasniti time što trošenje podloge dovodi do presjecanja vodnog lica, pogotovo prilikom usijecanja dubinskom erozijom (Bryan, 1919; Krešić, 2023). Istovremeno, trošenje određenih stijena povećava njihovu poroznost i propusnost (Briški i dr., 2020), čime su veće šanse za formiranje izvora relativno manje izdašnosti.

Analiza ekspozicije (orijentacije) padina na kojima se nalaze izvori pokazala je zanimljive rezultate. Najveću ulogu u ekspoziciji padina u ovom slučaju ima pružanje prostora istraživanja i njegova općenita nagnutost prema jugoistoku (prisojna strana). Rezultati su pokazali kako se na jugoistočnim i istočnim padinama nalazi najviše izvora (Tab. 4.4.4.1, Sl. 4.4.4.2), što je sukladno prethodno opisanom. Velik broj izvora nalazi se na sjeveroistočnim (14,33 %) i jugozapadnim padinama (15,44 %), koje se pružaju stranama doline potoka, čiji tok je općenito više ili manje okomit na smjer pružanja grebena Medvednice. Iznad prosječnu gustoću izvora nalazimo na istočno i jugoistočno orijentiranim padinama, te posebno na sjeveroistočnim padinama gdje je zabilježena najveća gustoća izvora općenito (12,87 izvora/km²). Zanimljivo je što se na zapadnim padinama, čija je površina veća od primjerice sjeveroistočnih padina (12,04 % površine naprema 11,74 % površine), nalazi puno manje izvora te njihova gustoća iznosi tek 6,44 izvora/km². To se može objasniti ostalim čimbenicima koji utječu na ekspozicijski položaj izvora (osim opće nagnutosti prostora istraživanja). Neki od tih čimbenika su pružanje rasjeda na istraživanom području te strukturalna nagnutost geoloških slojeva (Corsini i dr., 2009; Buczyński i Rzonca, 2011; 2018; Mocior dr., 2015; Płaczkowska i dr., 2018). Poznato je kako izvori nastaju duž rasjeda, čak češće duž manjih rasjeda, obično poprečnog pružanja na pružanje glavnih rasjeda (Mocior i dr., 2015), što je pokazalo i ovo istraživanje (Sl. 5.2.6). Isti rasjedi imaju utjecaj na formiranje potočnih dolina, a time i posljedično, zajedno s denudacijskim

procesima, na orijentaciju dolinskih strana i izvora na njima. Kako bi se potvrdio utjecaj rasjeda na ekspozicijski položaj izvora analiziran je smjer pružanja rasjeda (Sl. 5.3.5). Rasjedi usmjerenja sjeverozapad-jugoistok (NW-SE) te sjeveroistok-jugozapad (NE-SW) imaju dominantne udjele u ukupnoj duljini rasjeda. S obzirom na planinski reljef koji je obilježen brojnim potočnim dolinama strmih strana, logično će većina izvora koja prati rasjedne linije imati orijentaciju okomitu na pružanje te rasjedne linije. Točna orijentacija bit će definirana reljefom, odnosno orijentacijom strane doline te općenitom orijentacijom istraživanog područja. Dobiveni rezultati potkrjepljuju takvu pretpostavku. Rasjedi pružanja sjeveroistok-jugozapad (NE-SW) prema tome su uzrok pojave izvora na padinama s orijentacijom pretežno na jugoistok i sjeverozapad. Zbog općenite nagnutosti prostora istraživanja prema jugoistoku, na padinama te ekspozicije nalazimo njihov najveći broj i gustoću. U slučaju rasjeda pružanja sjeverozapad-jugoistok, oni uzrokuju pojavu izvora na padinama orijentiranih na sjeveroistok i jugozapad. Upravo najveće gustoće izvora pronađene su na tim padinama (Tab. 4.4.4.1; Sl. 4.4.4.2).



Sl. 5.3.5. Duljina rasjeda na istraživanom području prema njihovom pružanju

Broj i gustoća izvora prema zakrivljenosti padina pokazala je očekivane rezultate. Izvori se najviše nalaze na konvergentnim padinama ako govorimo o poprečnoj zakrivljenosti, odnosno konkavnim padinama ako govorimo o uzdužnoj zakrivljenosti padina (Tab. 4.4.5.1; Tab. 4.4.5.2). To se slaže s

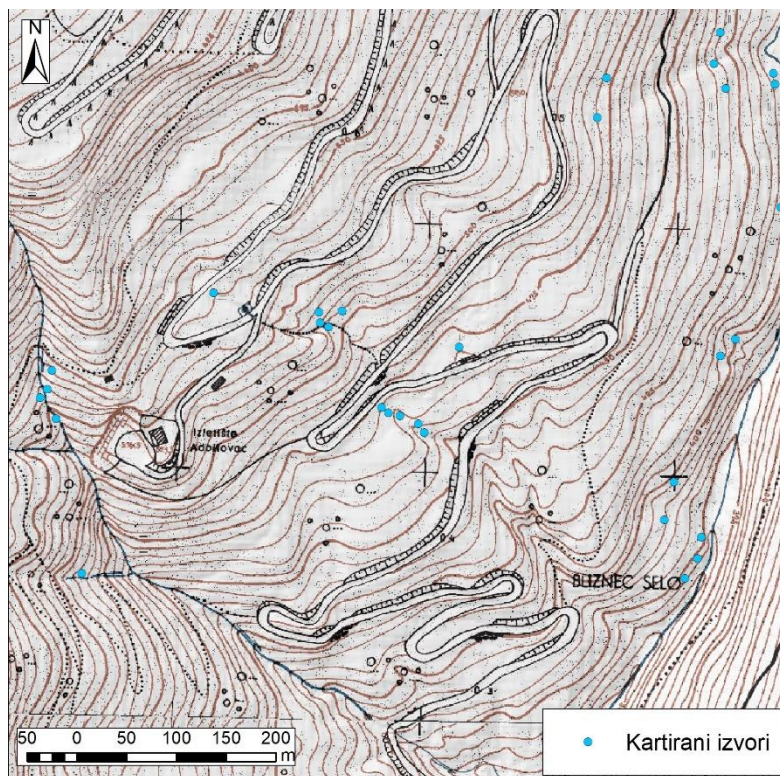
rezultatima drugih istraživanja, gdje je na navedenim oblicima padina također pronađen najveći broj izvora (Ozdemir, 2011; Pourtaghi i Pourghasemi, 2014; Moghaddam i dr., 2015). Tlo kod konkavnih padina zadržava puno više vlage nego u slučaju konveksnih padina (Knighton, 1998), dajući time bolju predispoziciju konkavnim padinama za formiranje izvora. Osim toga, konkavne, a posebno konvergentne padine povezane su s vododerinama, jarugama i potočnim dolinama. To su prostori izraženih fluviodenudacijskih procesa vezanih uz površinsko otjecanje vode, ali i plitko podzemno otjecanje (Dunne, 1980; Baker i dr., 1990; Knighton, 1998; Placzkowska i dr., 2015). Usijecanje vododerina, odnosno jaruga može dovesti do presijecanja litoloških formacija, a time i vodnog lica, što dovodi do pojave izvora (Bryan, 1919; Baker i dr., 1990; Dietrich i Dunne, 1993). Formiranje izvora i erozija uzrokovana tečenjem izvorske vodom uzrokuje još izraženiju konvergentnost i konkavnost padina. Taj proces pospješuje i unazadna erozija izvorišnog dijela koja destabilizira padinu i uzrokuje formiranje izvorišnih obluka (Dunne, 1980; Baker i dr., 1990; Dietrich i Dunne, 1993; Knighton 1998). Međutim, terenski je utvrđeno kako je u slučaju nekih izvora slabije izdašnosti akumulacija materijala jača od erozijskog djelovanja na njihovom području, zbog čega površinska voda ubrzo ponovno završi ispod razine zemlje. Pojačana akumulacija materijala uzrokovana je prirodnim, padinskim procesima, ali je ponekad i rezultat antropogenog utjecaja, kao što su ceste i veći šumarski putevi (Sl. 5.3.6). Prisutnost većih šumarskih puteva i asfaltirane ceste na području istraživanja uzrokuje akumulaciju materijala i često predstavlja prepreku za otjecanje vode, zbog čega ona: 1. mijenja smjer tečenja, 2. stvara blatnu/močvarnu/ujezerenu površinu, 3. procjeđuje se u tlo i potencijalno u podzemlje. To za posljedicu ima stvaranje izvora nizvodno, gdje voda koja se procjeđuje, odnosno međuotječe, ponovno izbija na površinu (Sl. 5.3.7).

Osim konvergentnih i konkavnih padina, izvori su također pronađeni i na konveksnim te na divergentnim padinama, kao i na zaravnjenim površinama (Tab. 4.4.5.1; Tab. 4.4.5.2). Treba napomenuti kako je u slučaju poprečne zakrivljenosti gustoća izvora podjednaka kod zaravnjenih površina i kod divergentnih, dok je u slučaju uzdužne zakrivljenosti gustoća izvora veća kod konveksnih padina nego kod zaravnjenih (Tab. 4.4.5.1; Tab. 4.4.5.2). Općenito se usporedbom rezultata gustoća izvora prema vrsti zakrivljenosti može ustanoviti kako poprečna zakrivljenost ima nešto veći značaj u prostornom rasporedu izvora nego što je to kod uzdužne zakrivljenosti, na što ukazuju i rezultati drugih istraživanja (Ozdemir, 2011). Također, prostori krškog i fluviokrškog morfogogenetskog tipa reljefa imat će nešto veću gustoću izvora na divergentnim padinama, nego što je to slučaj područja s fluviodenudacijskim morfogogenetskim tipom reljefa. To je posljedica manje

ovisnosti lokacije krških izvora o procesima površinskog i plitkog podzemnog otjecanja (Martinić i Čanjevac, 2024).



Sl. 5.3.6. Primjer utjecaja šumarskog puta na pronos sedimenta i tečenje vode



Sl. 5.3.7. Pojavnost izvora u prostoru oko Sljemenske ceste
Izvor: podloga Hrvatska osnovna karta (DGU, 2024)

Zakrivljenost padina uvelike utječe na površinsko i plitko podzemno otjecanje vode. Indeks topografske vlažnosti pokazatelj je koji ukazuje na vlažnost prostora. Vrijednosti indeksa topografske vlažnosti (TWI) prostora na kojima se nalaze izvori pokazali su relativno veliku raznolikost. Izvori se nalaze u gotovo svim rasponima vrijednosti indeksa, od vrijednosti 2,64 do 13,65 (Tab. 4.4.6.1). Najveći broj izvora (28,78 %) nalazi se na područjima TWI vrijednosti između 5 i 6 (Sl. 4.4.6.1). Gustoća izvora raste s porastom vrijednosti TWI, sve do razreda indeksa od 9 do 10, nakon kojeg je zabilježen nagli pad gustoće (Sl. 4.4.6.2). Slični odnosi dobiveni su i u drugim istraživanjima (Tien Bui i dr., 2019; Nhu i dr., 2020), gdje je ustanovljena pozitivna korelacija broja izvora s vrijednostima TWI te je navedeno kako je TWI jedan od najvažnijih veličina za predviđanje lokacije izvora. To se može objasniti time što porast vrijednosti TWI znači veću vlažnost tla, a time i zasićenje tla vodom. Prostori s vrijednošću TWI između 9 i 10 u ovom slučaju predstavljaju prijelazna područja prema stalnim tokovima, odnosno početke potočnih korita i jaruga. Zbog toga je na tim područjima najveća koncentracija, odnosno gustoća izvora. Kako su rezultati pokazali, izvori se javljaju na područjima različitih vrijednosti TWI, međutim to je uzrokovano različitim hidrogeološkim i pedološkim obilježjima prostora. Vrijednosti >10, u ovom istraživanju, uglavnom predstavljaju prostore relativno stalnih vodenih tokova, odnosno dijelove toka koji bi trebali biti nizvodno od izvora. Međutim, kod (fluvio)krških područja rezultati ne prate tu zakonitost i upitna je primjenjivost TWI-a na tim prostorima. On se odnosi na topografsku vlažnost, a kod (fluvio)krških područja izraženije je podzemno otjecanje. Metoda izračuna indeksa nailazi na ograničenja zbog reljefnih oblika (fluvio)krških prostora (Jenkins i McCauley, 2006). Naime prilikom izračuna TWI-a koriste se alati *Fill* i *Flow direction*, koji nailaze na probleme zbog krških reljefnih oblika, ponajviše zbog ponikava i ponora. Tome svjedoče i dobiveni rezultati, naime 7 od 10 izvora s najvišom vrijednosti TWI nalaze se na širem području krškog polja Ponikve na jugozapadu Medvednice.

Prilikom istraživanja planinskih izvora u planinama Sultan u Turskoj, 84,50 % izvora nalazilo se na prostorima vrijednosti TWI između 2 i 8 (Ozdemir, 2011). To je u skladu s rezultatima ovog istraživanja gdje se u istom rasponu TWI nalazi 86,44 % istraživanih izvora (Tab. 4.4.6.1). Međutim, ako se usporedi udio izvora u razredima vrijednosti TWI od 2 do 6 i od 6 do 8 dolazi do nesrazmjera. U istraživanju Ozdemira (2011) 37,25 % izvora nalazi se na područjima TWI od 2 do 6. U ovom istraživanju u istom rasponu nalazi se 52,67 % izvora. U razredu indeksa od 6 do 8 na području planina Sultan nalazi se 47,25 % izvora, dok je na području Medvednice taj udio manji i iznosi 33,78 % izvora. Razlike su moguće zbog veličine područja istraživanja (373 km² naprama 85,45 km²) i rezolucije

digitalnog modela reljefa, ćelije veličine 20 x 20 m korištene prilikom istraživanja u Turskoj naprema 5 x 5 m na području Medvednice (Agren i dr., 2014; Heštera i dr., 2023). Nešto drugačiji rezultati prikazani su u dvama istraživanjima na području Irana (Pourtaghi i Pourghasemi, 2014; Moghaddam i dr., 2015). Ondje u oba istraživanja, na dvama različitim istraživanim područjima udio izvora na područjima s vrijednošću indeksa manjom od 8 iznosi oko 37 %. Najveći broj analiziranih izvora u oba istraživanja nalazi se na područjima s vrijednošću indeksa između 8 i 12, 42 %, odnosno 54 % (Pourtaghi i Pourghasemi, 2014; Moghaddam i dr., 2015). Razlike u rezultatima ovih istraživanja i rezultata na području Medvednice su vjerojatno uzrokovane razlikama u veličini istraživanog područja (Iran – 3800 km² i 956 km² naprema 85,46 km² na Medvednici) te u detaljnosti baze podataka izvora. Samo 304, odnosno 457 izvora je korišteno na mnogo većim područjima istraživanja u Iranu naprema 900 na manjem području Medvednice.

Ostala istraživanja koja se bave modeliranjem lokacija izvora i procjenom utjecaja prostornih obilježja na njihov raspored su brojna. Koriste se različite statističke metode i metode strojnog učenja kao što su primjerice težine dokaza (*weights of evidence*), nasumična šuma (*random forest*) i omjer učestalosti/frekvencije (*frequency ratio*), kao i umjetna inteligencija. Često se kao bitna prostorna varijabla za predviđanje lokacija izvora ističu TWI i poprečna zakrivljenost padine (Ozdemir, 2011; Pourtaghi i Pourghasemi, 2014; Tien Bui i dr., 2019; Msaddek i dr., 2021). Udaljenost od lineamenta, odnosno rasjeda (Niraula i dr., 2021) te nagib padina u nekim istraživanjima su istaknuti kao jedna od najvažnijih prostornih varijabli vezanih za izvore (Tien Bui i dr., 2019, Chen i dr., 2020). Zanimljivo je da neka istraživanja ističu i nadmorsku visinu, čak i kao glavni čimbenik, međutim to je vrlo često posljedica nekih drugih obilježja koja se poklapaju s nadmorskom visinom (Pourtaghi i Pourghasemi, 2014; Chen i dr., 2020; Iván i dr., 2020, Msaddek i dr., 2021). Od varijabli koje nisu analizirane u ovom radu, a spominju se u nekim radovima u smislu dobre povezanosti s lokacijom izvora su litološka obilježja (Chen i dr., 2020), gustoća mreže otjecanja (Msaddek i dr., 2021), indeks snage tečenja (Chen i dr., 2020; Tien Bui i dr., 2019) te duljina padine (Pourtaghi i Pourghasemi, 2014, Msaddek i dr., 2021).

5.4. Odnos kategorija izdašnosti izvora s geološkim i morfometrijskim obilježjima prostora

Rezultati analize kategorija izdašnosti izvora pokazale su kako je najveći udio izvora kategorije VII (44.45 %), s izdašnošću između 0,01 i 0,1 L/s, potom kategorije VI (0,1 – 1 L/s), pa VIII (< 0,01 L/s) te je najmanje izvora s izdašnošću većom od 1 L/s (kategorije V i IV; Sl. 4.2.1). Takvi rezultati slažu se s drugim istraživanjima. Na prostoru Žumberka i Samoborskog gorja također je najveći broj izvora (35 % od ukupnog broja) svrstan u kategoriju izdašnosti VII (Vujnović, 2011). Na istom području druga po zastupljenosti izvora je kategorija VI (0,1 – 1 L/s), te zatim kategorija VIII (< 0,01 L/s). Kategorije izdašnosti V i IV najmanje su zastupljene, s 8 %, odnosno 2 % od ukupnog broja izvora (Vujnović, 2011). Na temelju istraživanja na području Papuka može se ustanoviti da je udio pojedinih kategorija izdašnosti slična. Iako točan broj i udio nisu navedeni za svaku kategoriju, od 63 istraživana izvora ukupno 7 ih je bilo kategorije V (1 – 10 L/s) i IV (10 – 100 L/s), dok su ostali bili u rasponu od VIII (< 0,01 L/s) do VI (0,1 – 1 L/s) (Miletić, 2014).

Izvori izdašnosti manje od 0,1 L/s (kategorija VII i VIII) dominiraju udjelom i u istraživanjima u drugim dijelovima svijeta. Na nekoliko istraživanja planinskih prostora u Poljskoj udio izvora s izdašnošću manjom od 0,1 L/s kretao se od 36 % do 59 %, ovisno o području istraživanja. U istim istraživanjima udio izvora kategorije VI (0,1 – 1 L/s) kretao se između 29 % i 47 %, a kategorije V (1 – 10 L/s) 2,92 % do 8 % (Rzonca i dr., 2008; Lasek i dr., 2012; Mocior i dr., 2015; Buczynski i Rzonca, 2018). Treba naglasiti da se u istim istraživanjima rijetko nalazilo izvora kategorije IV (10 – 100 L/s) ili više. Na planinskom istraživanom području u Nepal u također su prisutni izvori od kategorije VII do V (Pandit i dr., 2019). Istraživanje 384 izvora otoka Cape Breton u Kanadi pokazalo je kako je na tom području najveći udio izvora VII i VI kategorije, 27,1 % za svaku od njih. Nakon njih najzastupljenije kategorije bile su V (1 – 10 L/s) s 23,7 % te kategorija VIII (< 0,01 L/s) s 14,4 %. U kategoriju IV (10 – 100 L/s) svrstano je 7,5 % izvora, a kategoriju III (100 – 1000 L/s) 0,3 % njih (Baechler i dr., 2019). Iako su uspoređivana područja i istraživanja vrlo raznolika, vidljivo je kako su izvori kategorija izdašnosti VII i VI najučestaliji.

Utjecaj geoloških obilježja na izdašnost izvora analiziran je putem usporedbe udjela izvora različitih kategorija izdašnosti prema litostratigrafskim jedinicama. Rezultati su pokazali kako udjeli kategorija izdašnosti na području ortometamorfita i parametamorfita (oznake D,C 1 i D,C 2; Sl. 5.4.1) te miocenskih (litotamnijskih) vapnenaca i lapora (oznaka $2M^2_2$, Sl. 5.4.1) prate prosječni udio klasa izdašnosti na cijelom istraživanom području.

Konglomerati, breče i vapnenci gornjokredne starosti (oznaka $_{3,4}K^3_2$) pokazali su najveći udio klase VIII, s izdašnošću manjom od 0,01 L/s te značajno manji udio klase VI (0,1 – 1 L/s) i V (1 – 10 L/s) od prosjeka. Na područjima spomenutih litostratigrafskih jedinica stijene vjerojatno nemaju razvijene vodonosnike, čak i na području krednih vapnenaca, breča i konglomerata. Breče i konglomerati općenito imaju lošiji potencijal za formiranje vodonosnika ukoliko su slabo sortirani i ako su sastavljeni od fragmenata slabopropusnih stijena ili pak imaju varijabilnu poroznost i visok stupanj cementacije (Earle, 2015). Prema hidrogeološkim podacima radi se o prostoru pukotinske poroznosti gdje su stijene propusne tek plitko ispod površine, zbog čega su vodonosnici prostorno ograničeni, a izdašnost izvora slaba (Brkić i Čakarun, 1998a; 1998b). Kredni (scaglia) vapnenci ovog područja općenito su smanjene poroznosti i propusnosti (Šikić, 1995).

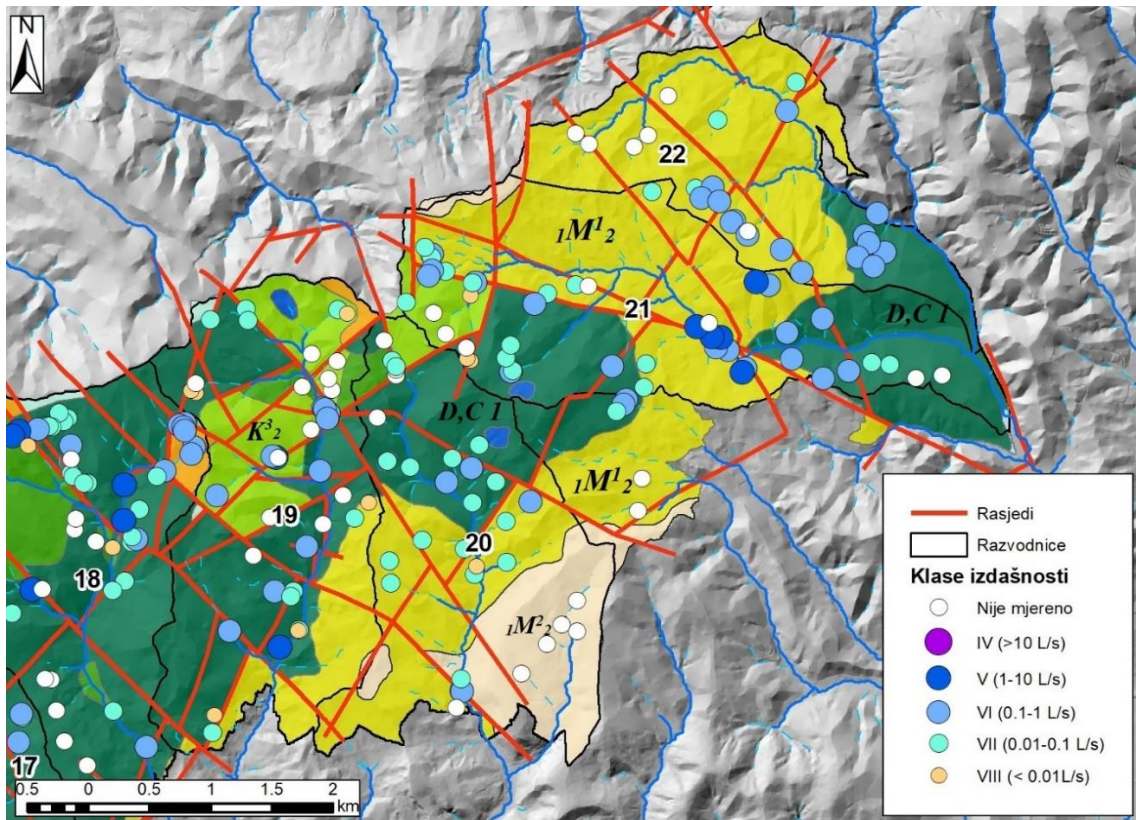
Izvori na litostratigrafske jedinice slične starosti (oznaka K^3_2), sastavljene od konglomerata, vapnenaca i lapora, pokazali različite udjele od prethodno opisanog (Sl. 4.3.3.1). Na području litostratigrafske jedinice K^3_2 izvori klase VIII ($< 0,01$ L/s) imaju ispod prosječni udio, a udio klasa VI (0,1 – 1 L/s) i V (1 – 10 L/s) je blago iznad prosjeka cijelog istraživanog područja. Radi se o području s međuzrnskom i pukotinskom poroznošću s ograničenim vodonosnicima, gdje bi izvori trebali biti vrlo slabe izdašnosti (Slišković i Šarin, 1999a; 1999b). Razlog za relativno odstupanje može biti u pojačanom trošenju stijena i lokalno povećanom proznošću i propusnošću. Također, potrebno je spomenuti mjerilo karte, budući da se ovdje radi o prostorno manjim i rascjepkanim litostratigrafskim jedinicama, pa su poneki izvori možda krivo pridruženi. Osim toga, radi se o području relativno velike gustoće rasjeda i kontakata, što može utjecati na blago odstupanje udjela izdašnosti.

Na području miocenskih konglomerata, šljunaka i pijesaka (oznaka $_{1}M^1_2$) također je pronađen manji udio najniže kategorije izdašnosti (kategorija VIII, $< 0,01$ L/s). Na području ove litostratigrafske jedinice zabilježen je najveći udio kategorije VI (0,1 – 1 L/s, izuzev litostratigrafske jedinice Pc) i V (1 – 10 L/s) (Sl. 4.3.3.1). Radi se o izvorima na krajnjem sjeveroistočnom dijelu istraživanog područja, odnosno poriječju potoka Vukov dol i Suhopot (pritoci Kašine; Sl. 5.4.1). Konglomerati, šljunci i pijesci zbog svoje poroznosti obično stvaraju dobre vodonosnike, ako nisu dobro konsolidirani (Earle, 2015), zbog čega je vjerojatno izdašnost izvora na ovom području relativno visoka. Međutim, prema hidrogeološkoj karti, radi se o području s međuzrnskom i pukotinskom poroznošću s ograničenim vodonosnicima, gdje bi izvori trebali biti vrlo slabe izdašnosti (Slišković i Šarin, 1999a; 1999b). Razlog za relativno odstupanje mogu biti hidrološki uvjeti u trenutku kartiranja. Naime, dio izvora tog područja

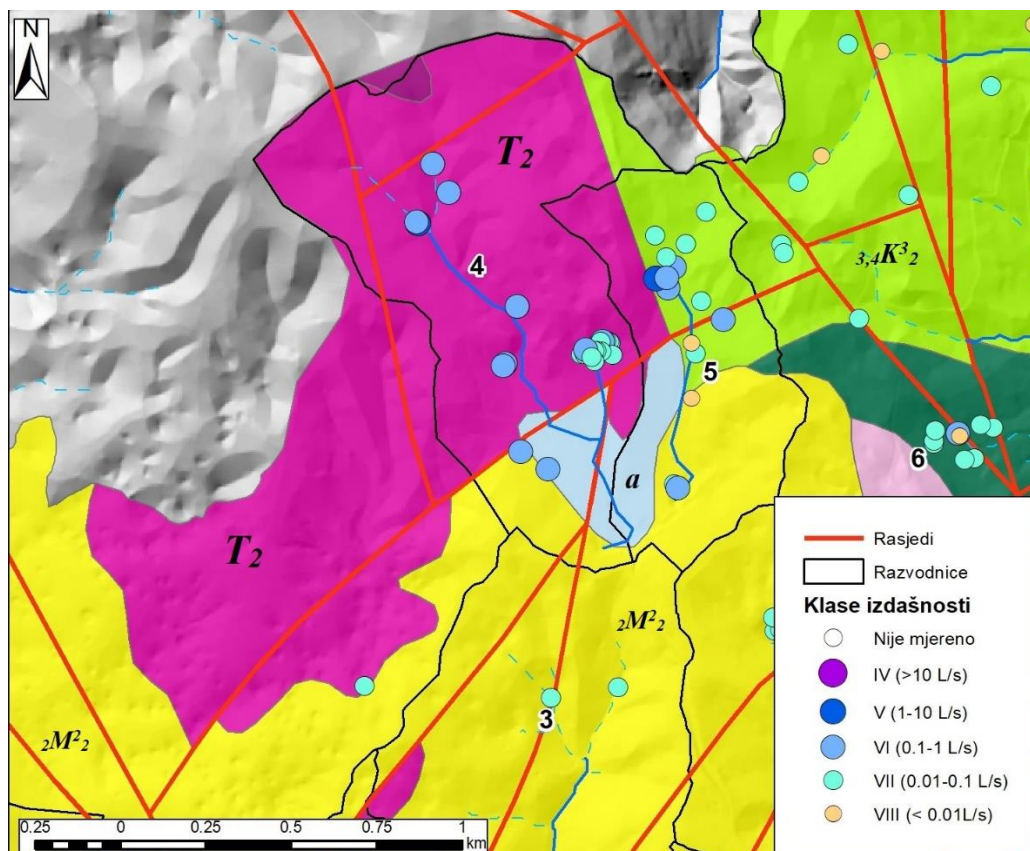
kartiran je u doba veće vlažnosti, odnosno veće količine padalina i viših vodostaja zbog čega je vjerojatno dio kategorija izdašnosti izvora precijenjen. Ali, treba napomenuti kako je dio najizdašnijih izvora kaptiran, što ipak ukazuje na mogućnost stvaranja razvijenijih vodonosnika. Većina najizdašnijih izvora smjestila se uz rasjede koji se pružaju tim područjem.

Najveći udio izvora (više od 60 %) na području litostratigrafske jedinice srednjotrijaskih karbonata (pretežno dolomiti, oznaka T₂) pripada klasi VII (0,01 – 0,1 L/s) (Sl. 4.3.3.1). Na području ove litostratigrafske jedinice nema izvora kategorije VIII s izdašnošću manjom od 0,01 L/s. Zanimljivo je što se svi izvori kategorije VII zapravo nalaze grupirani, na malom prostoru veličine manje od 300 m², zajedno s dva izvora kategorije VI (Sl. 5.4.2). Tako grupirani zapravo tvore izvorišno područje, odnosno sustav, koji može biti rezultat koncentriranih podzemnih tokova na relativno dobro okršenom području (Brkić i Čakarun, 1998a; 1998b; Bakalowicz, 2005; Ford i Williams, 2007). Njihov položaj, odnosno izbijanje vode na površinu vjerojatno je uvjetovano rasjedom koji prolazi ovim područjem te kontaktom trijaskih dolomita s holocenskim potočnim aluvijem.

Zanimljivo je što se na manjim područjima paleogenskih konglomerata i pješčenjaka (oznaka Pc) javljaju izvori isključivo klase izdašnosti VI (0,1 – 1 L/s). Međutim, treba spomenuti kako se radi o samo 7 izvora. Dakle, osim najveće gustoće izvora na ovoj litostratigrafskoj jedinici na njoj se nalaze relativno izdašni izvori. Prem hidrogeološkoj karti, jedinica Pc okarakterizirana je kao prostor slabije propusnosti s međuzrnskom i pukotinskom poroznošću, gdje su vodonosnici ograničeni, a izdašnost slaba (Brkić i Čakarun, 1998a; 1998b; Slišković i Šarin, 1999a; 1999b). Međutim, vjerojatno zbog svoje veličine, područja ovih stratigrafskih jedinica na istraživanom području nisu označena na hidrogeološkoj karti, zbog čega je moguće da njihova hidrogeološka svojstva lokalno mogu biti drugačija. Pješčenjaci i konglomerati, ukoliko nisu dobro konsolidirani, imaju predispozicije biti dobri vodonosnici (Earle, 2015). Kako bi se to potvrdilo potrebna su detaljnija istraživanja.



Sl. 5.4.1. Prostorni raspored izvora prema kategorijama izdašnosti na području litostratigrafske jedinice oznake $1M^1_2$ (miocenski konglomerati, pijesci i šljunci). Na karti brojkama su označena porječja potoka: 18 – Bidrovec; 19 – Vidovec; 20 – Čučerje; 21 – Vukov dol; 22 – Suhopot.



Sl. 5.4.2. Prostorni raspored izvora prema kategorijama izdašnosti na području litostratigrafske jedinice oznake T_2 (srednjetrojaski dolomiti). Na karti brojkama su označena poriječja potoka: 3 – Mačkovec; 4 – Jezeranec; 5 – Javorščak; 6 – Vrapčak (i Mikulić)

Osim raspodjele po litostratigrafskim jedinicama, raspored izvora prema kategorijama izdašnosti analiziran je i po udaljenosti od rasjeda. Statistička analiza ANOVA pokazala je kako su vrijednosti udaljenost od rasjeda statistički znatno drugačije između kategorija izdašnosti izvora. Nedostatak te analize je taj što nam rezultati ne govore između kojih varijabli postoje razlike (*One-way ANOVA in SPSS Statistics*, n.d.). Zbog toga su se razlike pokušale utvrditi i usporedbom udjela kategorija izdašnosti izvora prema udaljenosti od rasjeda (Sl. 4.3.3.2). Iako nisu ustanovljene značajne pravilnosti u promjenama udjela izvora različite izdašnosti s promjenom udaljenosti od rasjeda, vidljivo je kako su najizdašniji izvori (> 1 L/s) zastupljeni samo na relativno manjim udaljenostima od rasjeda (< 400 m). Zanimljivo je što udio druge najizdašnije kategorije izvora raste s udaljenosti od rasjeda, sve do udaljenosti razreda od 600 do 700 metara. Udio kategorija izvora relativno je pravilno raspoređen na najvećim udaljenostima od rasjeda (800 – 900 m), gdje su najzastupljeniji izvori najmanje izdašnosti (VIII), potom izvori kategorije VII i na kraju kategorije VI, dok kategorija V nije prisutna na tim udaljenostima (Sl. 4.3.3.2). Ovakvi rezultati ne mogu se jednostavno protumačiti, što samo potvrđuje

kompleksnost prirode izvora, te zaključujemo kako odnos kategorija izdašnosti i udaljenosti od rasjeda nije jednostavan.

Unatoč tome što su (hidro)geološka obilježja prostora ključna za nastanak vodonosnika, a time i vrlo bitna za određivanje hidroloških obilježja izvora, provedena je i analiza kategorija izdašnosti prema morfometrijskim obilježjima prostora, kako bi se utvrdilo postoje li neke zakonitosti ili pravilnosti na istraživanom prostoru. Rezultati prema hipsometrijskim razredima ne ukazuju da postoji jednostavna povezanost nadmorske visine i razreda izdašnosti te je njihov raspored uvjetovan drugim prostornim čimbenicima koji se ne ogledaju u hipsometrijskim razredima. Vidljivo je jedino kako je na najnižim nadmorskim visinama najznačajniji udio izvora izdašnosti veće od 0,1 L/s (Sl. 4.4.7.2).

Statistička analiza ANOVA pokazala je da postoje značajne razlike u srednjem nagibu padina između kategorija izdašnosti. Zbog spomenutog nedostatka metode, razlike su se pokušale utvrditi i usporedbom udjela kategorija izdašnosti izvora prema razredima nagiba padina (Sl. 4.4.7.4). Rezultati povezanosti nagiba padina s kategorijama izdašnosti nisu jednostavni za tumačenje. Ipak, ukazuju na to da je relativno veća zastupljenost izvora jače izdašnosti na područjima manjih nagiba, te obrnuto, da su najslabiji izvori najzastupljeniji na vrlo strmim padinama. Nagib padina povezan je s veličinom topografskih slijevnih područja početaka korita i jaruga (eng. *channel heads*), na način da se slijevna površina smanjuje s porastom nagiba padina (Montgomery i Dietrich, 1988). S manjom slijevnom površinom, logično, smanjuje se i količina vode koja ondje otječe. Uzmemo li u obzir da je većina izvora (barem 70 %) prostorno vezana uz početke korita i jaruga onda se ovakvi rezultati (barem u relativnim omjerima) poklapaju s povezanošću nagiba i slijevnih površina, odnosno količine vode. U prilog tome ide i rezultat korelacije vrijednosti TWI izvora i nagiba padina na kojima se nalaze, koji iznosi $-0,47$, odnosno koji ukazuje na umjerenu negativnu korelaciju dviju vrijednosti. Takav rezultat može se tumačiti postojanjem odnosa između tih dviju vrijednosti u kojem se smanjuje topografska vlažnost prostora s porastom nagiba padina i obrnuto.

Odnos vertikalne raščlanjenosti reljefa s kategorijama izdašnosti izvora također nije jednostavaa, međutim može se uočiti kako najslabijih izvora nema na prostorima najmanje vertikalne raščlanjenosti, odnosno na prostorima pojačane akumulacije materijala. Njihov udio i broj najveći su oko prosječnih vrijednosti vertikalne raščlanjenosti, koji su ranijom analizom okarakterizirani kao relativno najpogodniji za nastanak izvora. Izvori kategorije VII (0,01 – 0,1 L/s) relativno su ujednačeno zastupljeni u svim razredima vertikalne raščlanjenosti. Izvori kategorije VI (0,1 – 1 L/s)

u relativnom smislu su najmanje zastupljeni na prostorima prosječne vertikalne raščlanjenosti (kategorije 200 – 250 m/km² te 250 – 300 m/km²), a isto vrijedi i za najizdašnije izvore. U apsolutnom smislu, najveći broj izvora kategorije VI (0,1 – 1 L/s) nalazi se na relativno jače raščlanjenim područjima (300 do 350 m/km²), odnosno na prostorima izraženije razlomljenosti površine te pojačane denudacije. Najizdašniji izvori (> 1 L/s) najzastupljeniji su na područjima najveće i najmanje vertikalne raščlanjenosti, iako je njihov udio u svim kategorijama između 3 i 9 %. Razlozi za ovakve odnose u udjelima i broju izvora nisu posve jasni i zahtijevaju daljnja istraživanja, međutim rezultati impliciraju kako su izvori manje izdašnosti zastupljeniji na prostorima relativno umjerene vertikalne raščlanjenosti, gdje su procesi denudacije i akumulacije relativno ujednačeni. Osim toga, rezultati pokazuju kako su izdašnije kategorije izvora (V i VI) na istraživanom području u relativnom smislu zastupljenije na područjima relativno velike i relativno male vertikalne raščlanjenosti, iako u apsolutnom broju to nije pravilo.

5.5. Čimbenici fizikalno-kemijskih obilježja izvorske vode

Mjerena fizikalno-kemijska obilježja vode pokazala su relativno veliku raznolikost, posebno u slučaju EC. Razlozi te raznolikosti mogu biti različiti, prirodni i antropogeni. Praćenje izvora također je pokazalo kako pojedini izvori mogu imati vrlo varijabilne vrijednosti fizikalno-kemijskih obilježja. U usporedbi s drugim istraživanjima na području Medvednice, rasponi izmjerenih vrijednosti fizikalno-kemijskih parametara se poklapaju. U istraživanju na jugozapadnom dijelu istraživanog područja (Brletić, 2017) izmjerene pH vrijednosti kretale su se od 6,23 do 8,06, a temperature od 5,4 °C do 12,1 °C. U istraživanju na sjeveroistočnom dijelu Medvednice (Lovrić i dr., 2017), koje se djelomično poklapa s istraživanim područjem, izmjerene su temperature vode od 9 °C do 14 °C na 14 uzoraka uzetih iz kaptiranih izvora, bunara i vodosprema. To se poklapa s rasponima mjerenih vrijednosti izvora ovog istraživanja. U istom istraživanju mjerene su vrijednosti pH i EC. Vrijednosti pH na istim uzorcima pokazale su relativno malu varijaciju, od 7,23 do 7,8, dok su vrijednosti EC bile između 134 μS/cm i 507 μS/cm, što je također u rasponu vrijednosti ovog istraživanja. Iako u blizini istraživanog područja, na području Podsuseda, postoje termalni izvori (Kranjec, 1963), prema rezultatima mjerenja, unutar istraživanog područja nije ustanovljena njihova prisutnost. Što se tiče EC, ona nam ukazuje na količinu otopljenih minerala u vodi. O tome što je mineralna voda može se raspravljati jer gotovo sva voda sadrži barem malu količinu minerala

(Bryan 1919; Clarke, 1924). Granične vrijednosti koje razdvajaju mineralnu vodu od slatke vode često su subjektivno određivane. U Hrvatskoj se mineralnom vodom smatra ona koja sadrži 1 g/L otopljenih krutih tvari (*Pravilnik o prirodnim mineralnim, prirodnim izvorskim i stolnim vodama*, 2019; *Hrvatska enciklopedija*, 2013), što otprilike odgovara vrijednosti EC od 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. U svrhu ovog istraživanja uzeta je granična vrijednost od 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Dadić, 2003), budući da je pronađeno nekoliko izvora koji prelaze tu vrijednost i odudaraju od ostalih izvora. Ukupno je 11 istraživanih izvora na kojima je izmjerena EC veća od 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Međutim, na 10 od tih 11 izvora smatra se, a djelomično je i dokazano praćenjem izvora i laboratorijskom analizom (Tab. 4.7.3.1; 4.7.3.2; 4.7.3.3), da je došlo do antropogene mineralizacije uzrokovane zasoljavanjem prometnica na istraživanom području (Jurišić i dr., 2015; Bulić, 2016). Na jednom izvoru potoka Trnava, nazvanom izvor Slani, u sklopu ovog istraživanja izmjerena je vrijednost bila je 2062 $\mu\text{S}/\text{cm}$, što je najviša izmjerena vrijednost uopće na području istraživanja. Kod njega je laboratorijskom analizom dokazana povećana prisutnost kalcijevih i sulfatnih iona koji ukazuju na prisutnost gipsa, evaporitne stijene koja je vrlo topiva u vodi. Na Medvednici je zabilježeno nekoliko nalazišta gipsa (Zagorščak, 1988). Jedno nalazište na području je Slanog potoka, koji se nalazi sa *zagorske* strane Medvednice. Njegov izvorišni dio nalazi se s druge strane grebena od spomenutog izvora, oko 750 metara zračne udaljenosti. Najbliže nalazište gipsa nalazi se oko 700 metara nizvodnije od istraženog izvora, uz potok Vidovec (Jamičić i Slovenec, 2002), no koncentracije sulfatnih iona ukazuju na prisutnost evaporitnih stijena u ili uz vodonosnik izvora. S obzirom na nalazišta gipsa u okruženju i na rezultate analize vode, može se zaključiti kako se u ovom slučaju radi o prirodnom mineralnom izvoru.

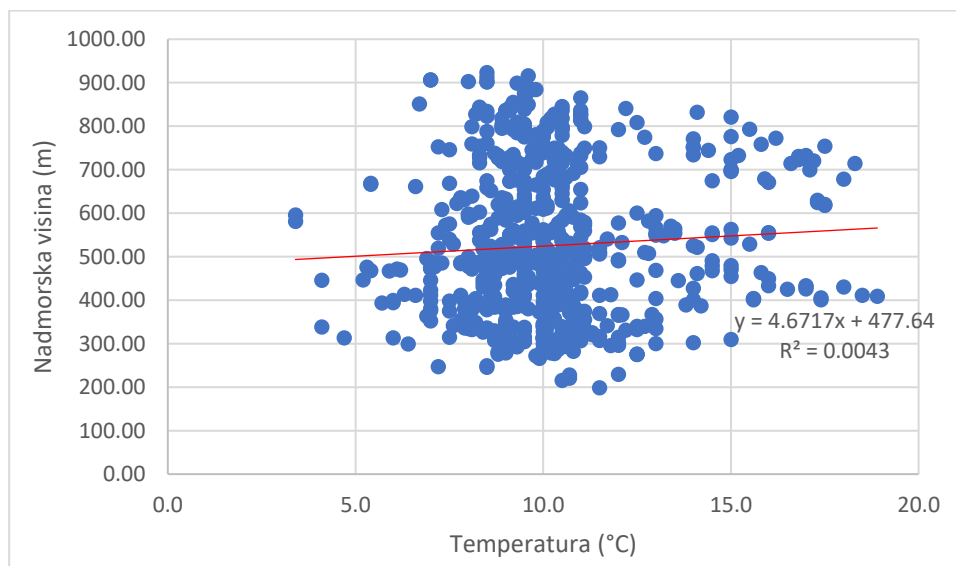
Na području Žumberka i Samoborskog gorja, koje je geološki građeno od puno većeg udjela stijena podložnih okršavanju, provedeno je istraživanje u kojem su prikazani sezonski i godišnji prosjeci terenskih mjerenja fizikalno-kemijskih obilježja. Vrijednosti sezonskih prosjeka temperature po litostratigrafskim jedinicama kreću se od 10,32 °C izmjerenih u hladnijem dijelu godine do 14,62 °C izmjerenih u toplijem dijelu godine. Godišnji prosjeci su između 11,23 °C i 11,96 °C, ovisno o dijelu istraživanog područja (Vujnović, 2011). Prosječne vrijednosti EC mjerene u istom istraživanju iznose od 334 $\mu\text{S}/\text{cm}$ do 603 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ovisno o litostratigrafskoj jedinici, a vrijednosti pH od 7,54 do 8,11, što odgovara karbonatnoj osnovi istraživanog područja (Vujnović, 2011) i usporedivo je s rezultatima na krškim dijelovima Medvednice u ovom istraživanju.

Gledajući istraživanja izvan Hrvatske, vrijednosti fizikalno-kemijskih parametara su vrlo raznolike, ovisno o geološkim, hidrološkim i klimatološkim uvjetima podneblja. Tome vrlo dobro svjedoči istraživanje na području savezne države Nevade, točnije pustinje Mojave, gdje je provedena analiza mjerenja fizikalno-kemijskih obilježja na vrlo velikom broju izvora (> 1600). Rezultati su pokazali kako se temperature vode nevadskih izvora kreću od minimalnih 3,3 °C do čak 107 °C. Vrijednosti EC variraju od 2,6 do 58 700 µS/cm, a pH od 4 do 9,9 (Sada i Lutz, 2016).

U istraživanjima sličnim i bliskijim ovom, na planinskim područjima Karpata na jugu Poljske izmjerene temperature izvora bile su od 6,1 °C do 13 °C. Vrijednosti pH bile su u rasponu od 5,3 do 8,2, a EC od 30 µS/cm do 2790 µS/cm, što ukazuje na prisutnost izvora plitkog podzemnog otjecanja, kao i mineralnih izvora (Buczinsky i Rzonca, 2018). Srednja vrijednost EC *nemineralnih* izvora iznosila je 270 µS/cm, što je za 120 µS/cm manje nego na području Medvednice. Također u Poljskoj, ali na jugoistoku zemlje, u gorju Bieszczady izmjerene vrijednosti bile su nižih raspona, od 28 do 287 µS/cm, sa srednjom vrijednošću od 130,6 µS/cm (Mocior i dr., 2015). Temperaturne vrijednosti istih izvora kretale su se od 5,3 °C do 15,4 °C. Može se zaključiti kako u istraživanim planinama Poljske postoji različitost između fizikalno-kemijskih obilježja izvora. Rasponi temperatura izvora poklapaju se djelomično s onima na Medvednici, iako se radi o višim nadmorskim visinama i drugačijim klimatskim obilježjima. S druge strane, bitnije je istaknuti da postoji relativno veliki raspon u mjerenim vrijednostima temperature, što znači da je i ondje izvorska voda podložna vanjskim utjecajima. Vrijednosti EC *nemineralnih* izvora relativno su niže od onih na Medvednici, što je prvenstveno uzrokovano različitim geološkim (litološkim) obilježjima prostora istraživanja i većim antropogenim utjecajem na Medvednici.

U SAD-u, u saveznoj državi Oregon, na planinskom području poriječja rijeke Crooked River (500 – 1800 m nadmorske visine), uspoređivani su rasponi vrijednosti fizikalno-kemijskih obilježja izvorske vode. Raspon vrijednosti EC na istraživanim izvorima bio je od 30 do 704 µS/cm, pH od 5,81 do 8,67, a temperature od 5 °C do 19,5 °C (Freed i dr., 2019). I ovdje je vidljivo kako su mjereni parametri pokazali sličnu varijabilnost kao i na Medvednici, pogotovo u slučaju temperature i pH. Slični rasponi vrijednosti zabilježeni su i na istraživanim područjima u Švicarskoj (Zollhoefer i dr., 2000; von Fumetti i dr., 2007), Nepal (Pandit i dr., 2019), Kanadi (Baechler i dr., 2019) i Iranu (Tien Bui i dr., 2019). Temperatura podzemne vode nekog prostora u pravilu odgovara srednjoj godišnjoj temperaturi zraka tog područja, osim kod termalnih voda (Bryan, 1919). Srednja

temperatura zraka na postaji Zagreb Maksimir (nadmorska visina: 123 m) u razdoblju od 1991. do 2020. iznosi 11,9 °C, a za postaju Puntijarka (nadmorska visina: 991 m) 7,5 °C (DHMZ, 2024). U posljednjih 5 godina, u razdoblju od 2019. do 2023. na postaji Zagreb Maksimir srednja godišnja temperatura zraka iznosila je 12,9 °C, a za postaju Puntijarka 8,5 °C (DHMZ, 2024). Temperatura zraka pada s porastom nadmorske visine (Freed i dr., 2019), stoga je logično da s porastom nadmorske visine manja i temperatura podzemne, odnosno izvorske vode. Kako bi se utvrdilo postoji li takva pravilnost na području Medvednice sve izmjerene temperaturne vrijednosti izvorske vode stavljene su u odnos s nadmorskim visinama izvora na kojima su mjerenja napravljena te je izračunata korelacija tih dviju veličina. Koeficijent korelacije ($r = 0.065$) pokazao je vrlo slabu pozitivnu povezanost, odnosno na povezanosti gotovo nema, čemu svjedoče i vrijednosti R^2 (Sl. 5.5.1).



Sl. 5.5.1. Odnos izmjerenih temperatura izvorske vode i nadmorske visine

Razloga za takav rezultat i odnos može biti nekoliko. Mogući prvi razlog je taj što u slučaju većine izvora vjerojatno nema razvijenog većeg vodonosnika, odnosno nema veće količine podzemne vode koja bi duljim vremenom zadržavanja u podzemlju poprimila njegovu temperaturu već je dominantno plitko otjecanje. Također, praćenje izvora pokazalo je kako se i na relativno izdašnim izvorima pojavljuju promjene u temperaturi unutar godine. Drugi vjerojatan razlog vezan je uz brzinu i količinu istjecanja vode. Naime velik broj izvora ima relativno malu izdašnost, a sukladno tome i relativno male brzine tečenja. Takva voda podložna je vanjskim utjecajima kao što su direktno sunčevo zračenje, temperatura zraka ili temperatura tla, koji mogu utjecati na njenu

temperaturu. Tako su u toplijem dijelu godine izmjerene veće temperature vode, a u zimskom vrlo niske temperature (Tab. 5.5.1; Sl. 5.5.2). Izvori niskog i jako niskog kapaciteta, kakvi su u istraživanom području česti, napajaju se iz vrlo plitkih, pripovršinskih vodonosnika, u kojima se voda najčešće ne zadržava duže vrijeme, te su oscilacije temperatura podložne trenutnim temperaturama zraka. Kod izvora s dubljim, izraženijim vodonosnicima, temperatura vode otprilike odgovara srednjoj godišnjoj temperaturi zraka u slijevnom području (Appelo i Postma, 2005). Najniže izmjerene temperature zabilježene su u (rano) proljeće, u vrijeme otapanja snijega te u zimskim mjesecima, a najviše u ljetnim mjesecima, iako su vrlo visoke temperature zabilježene i u proljetnim i u jesenskim mjesecima. Ekstremno visoke i niske vrijednosti pokazane su na grafičkim priložima kao iznimke (*outliers*; Sl. 4.5.1.1; Sl. 5.5.2). Najveća apsolutna amplituda zabilježena je u proljetnim mjesecima, a najveća amplituda između prvog i trećeg kvartila, najveća standardna devijacija i koeficijent varijacije zabilježeni su u ljetnim mjesecima (Tab. 5.5.1). To se može objasniti razlikom u temperaturi slabijih procjernih izvora i relativno jačih izvora dubokih vodonosnika sa stalnijom temperaturom, koji i u ljetnim mjesecima imaju temperaturne vrijednosti oko prosječne godišnje temperature zraka.

Tab. 5.5.1. Razlika u izmjerenoj temperaturi izvorske vode između godišnjih doba

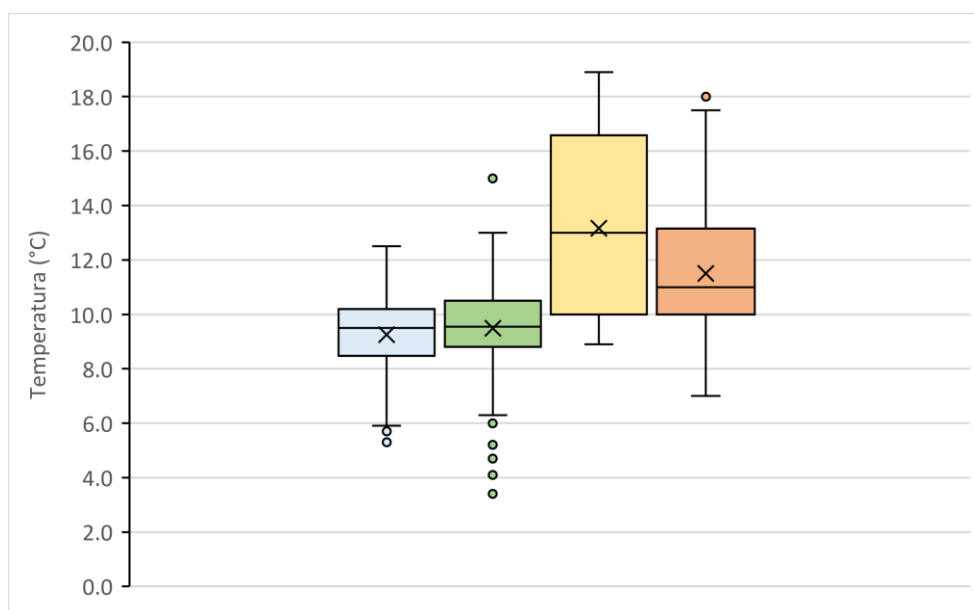
	Zima	Proljeće	Ljeto	Jesen
Srednja temperatura (°C)	9,25	9,49	13,16	11,50
Min (°C)	5,30	3,40	8,90	7,00
Q25 (°C)	8,48	8,80	10,00	10,00
Q75 (°C)	10,20	10,50	16,53	13,20
Max (°C)	12,50	15,00	18,90	18,00
Apsolutna amplituda (°C)	7,20	11,60	10,00	11,00
Q75 - Q25 (°C)	1,73	1,70	6,53	3,20
Standardna devijacija (°C)	1,46	1,52	3,27	2,41
Koeficijent varijacije	15.83	16.05	24.84	20.97

Dodatni argument ovim tvrdnjama daju i rasponi izmjerenih vrijednosti temperature izvorske vode unutar različitih kategorija izdašnosti izvora. Vidljivo je kako se s porastom izdašnosti smanjuje apsolutna amplituda, kao i raspon vrijednosti temperatura između prvog i trećeg kvartila (Tab. 5.5.2; Sl. 5.5.3). Isti rezultat pokazuju i standardna devijacija te koeficijent varijacije, s iznimkom da je u slučaju izvora kategorije izdašnosti VI manja vrijednost standardne devijacije i koeficijenta

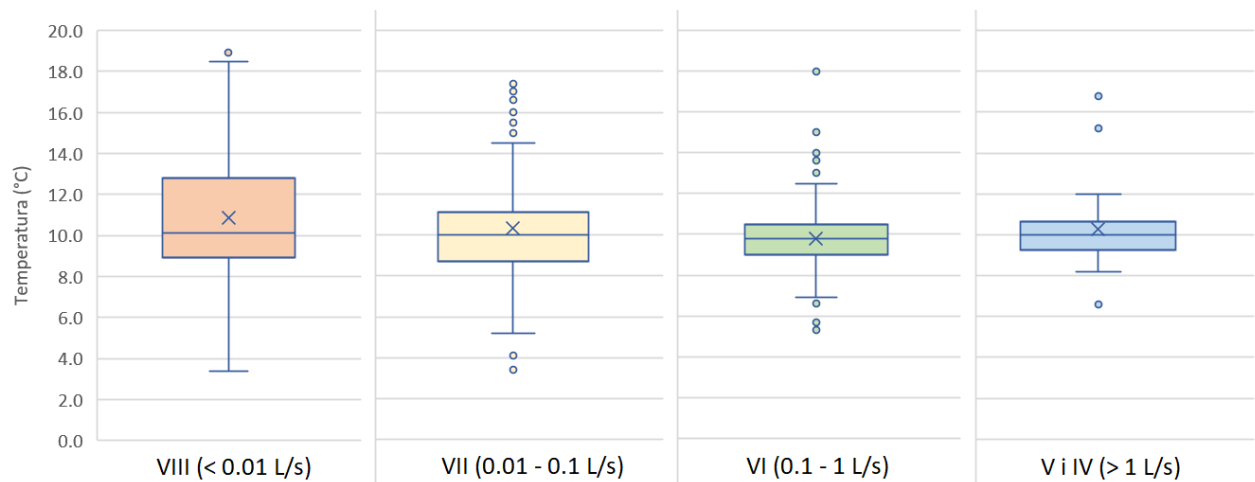
varijacije nego u slučaju izvora kategorije V (Tab. 5.5.2). Ovakva raspodjela varijabilnosti temperatura prema kategorijama izdašnosti vjerojatno je posljedica već ranije spomenute podložnosti manje izdašnih izvora promjeni temperature uzrokovane vanjskim utjecajima te kraćeg zadržavanja vode u podzemlju, pogotovo u slučaju niskih temperatura. Uz navedeno, treba naglasiti da je većina mjerenja izvršena samo u trenutku kartiranja izvora, što utječe na preciznost i pouzdanost podataka.

Tab. 5.5.2. Vrijednosti temperature izvorske vode prema kategorijama izdašnosti izvora

Kategorija izdašnosti	VIII ($< 0,01$ L/s)	VII ($0,01 - 0,1$ L/s)	VI ($0,1 - 1$ L/s)	V i IV (> 1 L/s)
Srednja temperatura (°C)	10,80	10,30	9,80	10,30
Min (°C)	3,40	3,40	5,30	6,60
Q25 (°C)	8,90	8,70	9,00	9,25
Q75 (°C)	12,80	11,10	10,50	10,65
Max (°C)	18,90	17,50	18,30	16,80
Apsolutna amplituda (°C)	15,50	14,10	13,00	10,20
Q75 - Q25 (°C)	3,90	2,40	1,50	1,40
Standardna devijacija (°C)	3,09	2,52	1,61	1,86
Koeficijent varijacije	28,57	24,51	16,44	18,09



Sl. 5.5.2. Raspon izmjerenih temperatura izvorske vode u zimi (plavo), proljeće (zeleno), ljeto (žuto) i jesen (narančasto)

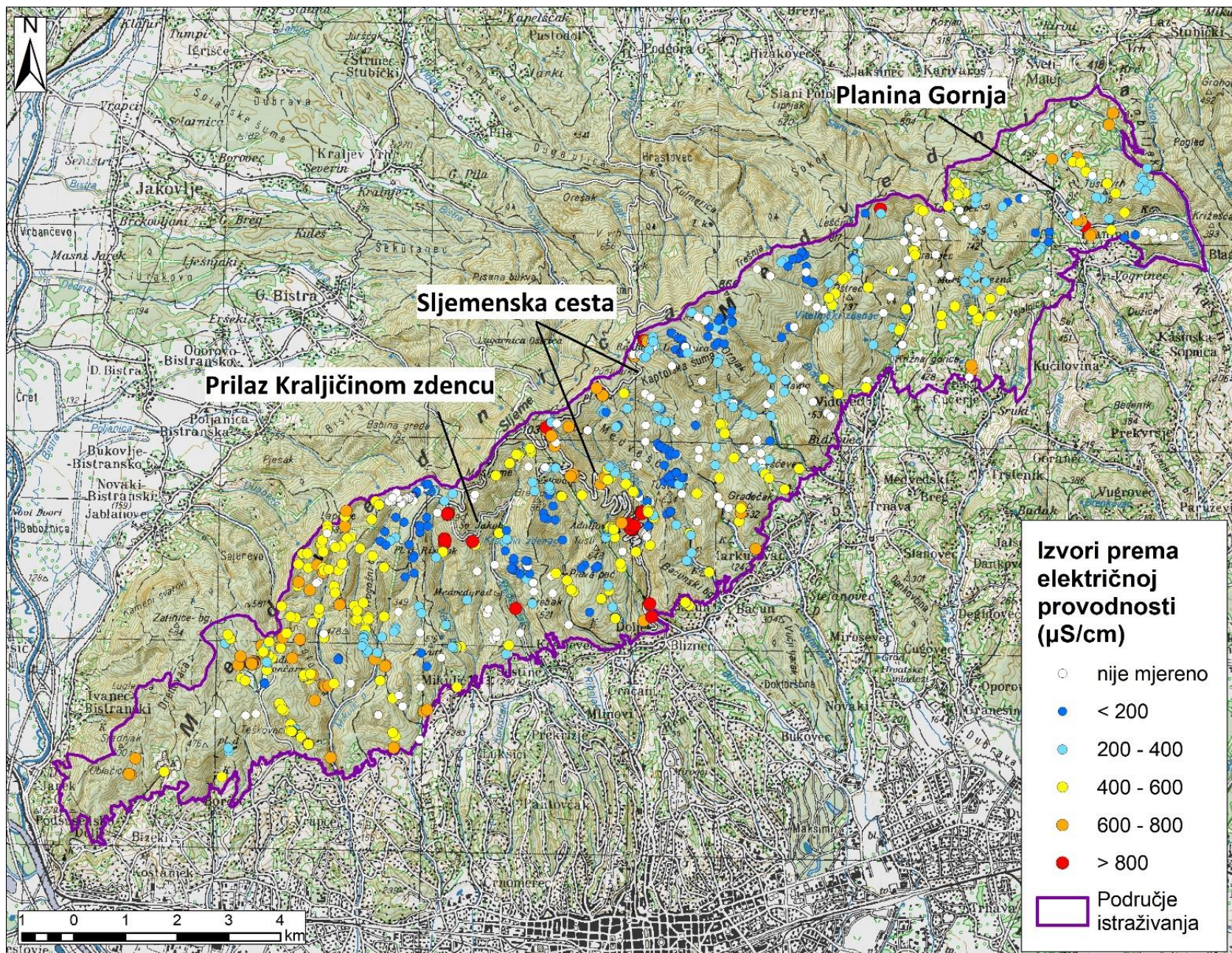


Sl. 5.5.3. Raspon izmjerenih temperatura vode prema kategorijama izdašnosti izvora

Jedan od najvažnijih čimbenika koji utječe na fizikalno-kemijska obilježja vode jesu litološka obilježja prostora. Plinije Stariji još je u 1. stoljeću rekao: *Tales sunt aquae qualis terra per quam fluunt*, odnosno: *Takve su vode kao i zemlja kroz koju teku*. Analiza izmjerenih vrijednosti pH i EC prema litostratigrafskim jedinicama pokazala je kako su najmanje varijacije u vrijednostima EC na prostorima litostratigrafskih jedinica T₂ (srednjetrijski dolomiti), ₂M²₂ (miocenski vapnenci; Sl. 4.5.4.1). Takvi rezultati mogu se objasniti upravo karbonatnim litološkim sastavom ovih litostratigrafskih jedinica. Trijaski dolomiti te miocenski litotamniji vapnenci na jugoistočnom dijelu istraživanog područja relativno su dobro okršeni, što ukazuje na njihovu mogućnost stvaranja značajnijih vodonosnika u kojima se voda dulje zadržava, što smanjuje varijabilnost EC. Tome svjedoče i relativno visoke vrijednosti EC, koje su rezultat duljeg zadržavanja vode u podzemlju koje je građeno od dobro topivih stijena. U prilog toj tvrdnji idu i minimalne izmjerene vrijednosti pH na tom području, koje su veće od 7,10 i značajno veće od svih drugih minimalnih vrijednosti na području drugih litostratigrafskih jedinica (Sl. 4.5.4.2). To ukazuje na relativno dulje zadržavanje vode u podzemlju.

Velika raznolikost izmjerenih vrijednosti EC i pH zabilježene su na prostorima litostratigrafskih jedinica devonskih i karbonskih parametamorfita i ortometamorfita (oznake D,C 1 i D,C 2), te na području miocenskih konglomerata, šljunaka i pijesaka (oznaka ₁M¹₂). Prostori parametamorfni i ortometamorfni stijena Medvednice većinom nemaju obilježja koja bi bila pogodna za stvaranje velikih i dubokih vodonosnika, zbog čega bi mjerene vrijednosti pH i EC trebale biti relativno niske. Naime pH vrijednost, kao i EC oborinskih voda vrlo su niske te bi u slučaju kraćeg zadržavanja u podzemlju ili samo procjeđivanja trebale ostati relativno niske. U dijelu izvora to i jest slučaj, međutim

postoji i vrlo velik broj izvora s visokim vrijednostima EC i pH. Zbog toga treba pretpostaviti da osim litoloških uvjeta i vremena zadržavanja vode, na fizikalno-kemijska obilježja izvorske vode utječe i nešto drugo. Većina izvora vrlo visokih vrijednosti EC nalazi se u blizini ili nizvodno od asfaltiranih prometnica kao što su Sljemenska cesta, Prilaz Kraljičinom zdencu, Gornji Lukšić te prometnice na području naselja Planina Gornja (Sl. 5.5.4). Sve navedene prometnice redovito se u hladnijem dijelu godine tretiraju sredstvima protiv zaleđivanja (sol) kako bi se spriječilo zaleđivanje ceste. Uglavnom se radi o solima lakih metala: natrijev klorid NaCl, kalcijev klorid CaCl₂, magnezijev klorid MgCl₂ i nekim drugim kemijskim spojevima. Pretežno se koristi natrijev klorid (97 %; Šimunjak, 2006, prema Bulić, 2016). Prethodna istraživanja (Jurišić i dr., 2015; Bulić, 2016) utvrdila su utjecaj sredstava protiv zaleđivanja na tlo i vegetaciju u području uz cestu. Pretpostavka je dakle, da se ta sol otapa djelovanjem padalina i topljenjem snijega te dalje plitkim podzemnim putem dolazi do izvora ili njihovih vodonosnika. Laboratorijskom analizom ionskog sastava vode na izvorima Malog potoka (potok Črnomerec) te na Kraljičinom zdencu utvrđene su povišene vrijednosti natrijevih i kloridnih iona (Tab. 4.7.3.1; 4.7.3.2; 4.7.3.3). Prisutnost soli, odnosno iona natrija i klora značajno povećava EC vode. Što se tiče vrijednosti pH, njihova varijabilnost može biti posljedica mnogih okolišnih čimbenika (osim vremena zadržavanja vode te litološkog sastava i topivosti stijena), kao što su biološki procesi vezani uz mikroorganizme u vodi, vegetacijski pokrov u okolici izvora, izloženost atmosferskim utjecajima (polutanti, izravno sunčevo zračenje i dr.) te razni antropogeni utjecaji. U sklopu ovog istraživanja nisu utvrđeni glavni razlozi za varijabilnost pH vrijednosti, te su za to potrebni dodatni podaci i istraživanja. Vrlo niske vrijednosti obično su mjerene kod manje izdašnih izvora jedan ili dva dana nakon padalina ili prilikom topljenja snijega.



Sl. 5.5.4. Prostorni raspored izvora prema vrijednostima električne provodnosti (EC)

5.6. Tipovi izvora Medvednice

Rezultati podjele izvora po Steinmannovim i Thienemannovim tipovima pokazali su kako je najveći broj helokrenih izvora. Nakon njih su najzastupljeniji reokreni izvori. Jako rijedak tip su limnokreni izvori. Zbog neobuhvatnosti i nedovoljne preciznosti ovakve klasifikacije izvora dani su prijedlozi dodatnih tipova izvora Medvednice. Tom podjelom uvedeni su stjenski tipovi te prijelazni tipovi izvora koji čine više od četvrtinu izvora kojima je određen tip. Također su dodatno izdvojeni izvori koji su antropogeno izmijenjeni. I po ovakvoj detaljnijoj podjeli najveći je broj helokrenih izvora, dok su drugi najzastupljeniji upravo prijelazni izvori. Dio izvora okarakteriziran je kao *ostali*, zbog svoje jedinstvenosti. Radi se o nekoliko izvora koji se javljaju unutar ponikava na jugozapadnom krškom dijelu Medvednice. Na tom prostoru je i izvor Jambrišakovo vrelo koji zbog svoje specifične morfologije, koja je djelomično i antropogeno utjecana, nije mogao biti svrstan niti u jedan od opisanih tipova. Dva izvora koji također nisu mogli biti svrstani u niti jedan drugi tip odgovaraju izloženom tipu (*exposure spring*) prema klasifikaciji Springera i Stevensa (2009).

Rezultati su također pokazali kako postoje određene razlike između izdašnosti izvora različitih tipova. Antropogeno izmijenjeni izvori imaju najveće udjele izdašnijih kategorija izvora, što je i logično iz nekoliko razloga. Takve izvore lakše je uočiti te su vjerojatno korišteni već dugi niz godina. Krajem 19. i tijekom 20. stoljeća pojedini izvori su kaptirani i uređivani, što u svrhu lokalne vodoopskrbe, što za potrebe izletnika, odnosno planinara. Oni slabije izdašni izvori koji su antropogeno izmijenjeni najčešće se koriste smu za potrebe planinara i izletnika. Zanimljivo je što se veliki broj antropogeno izmijenjenih, odnosno zahvaćenih izvora nalazi na nižim područjima (Sl. 4.6.5). To su ujedno i izdašniji izvori, koji su vjerojatno zbog svoje dostupnosti iskorišteni od strane čovjeka. Helokreni izvori imaju najveći udio izvora najmanje izdašnosti te niti jedan izvor s izdašnošću većom od 1 L/s. Reokreni izvori imaju najveći udio izdašnijih izvora kategorija V (>1 L/s) i VI (0,1 – 1 L/s) od svih prirodnih tipova. Stijenski izvori su relativno malobrojni (14), ali je vidljivo kako nema izvora njihova tipa s izdašnošću većom od 1 L/s. Tipovi se dakle razlikuju prema određenim hidrološkim posebnostima.

Određivanje tipa izvora prema njihovom položaju u hidrografskoj mreži nešto je jednostavnije. Dominantan je udio takozvanih početnih izvora, te potom bočnih izvora i izvora u koritu. Zabilježena su samo 3 izvora u ponikvama, iako ih vjerojatno ima i više. Što se tiče izdašnosti

izvora, bočni izvori i početni izvori imaju relativno jednolik udio svih kategorija izdašnosti. Izvori u koritu imaju veći udio izdašnijih kategorija (V i VI) te značajno manji udio izvora najslabije izdašnosti (VIII). To se možda može objasniti time što je mjesto izbijanja vode u slučaju izvora u koritu u razini s vodnim licem potoka uz koje se javljaju, dok je u slučaju bočnih izvora došlo do spuštanja vodnog lica jačim usjecanjem glavne doline potoka. Pretpostavka je da će izvori u koritu s vremenom, uz daljnje usjecanje glavne doline potoka, vjerojatno postati bočni izvori, dok će bočni, ukoliko imaju povoljne hidrogeološke uvjete, razviti vlastita korita, odnosno jaruge te s vremenom postati početni ili će pak presušiti.

5.7. Posebnosti praćenih izvora

Iako je razdoblje praćenja bilo relativno kratko za detaljnije hidrološke analize, prikupljeni podaci ukazuju na neka osnovna obilježja izvora te su otvorili brojna pitanja. Minimalni protoci na svim izvorima zabilježeni su većinom u rujnu, listopadu i studenom. To je vjerojatno posljedica relativno suhog, ali i vrućeg ljeta prilikom kojeg dolazi do smanjenog dotoka vode u podzemlje. U toplijem dijelu godine evapotranspiracija je pojačana zbog visokih temperatura i razvijene vegetacije te nema sniježnih padalina. Maksimalni protoci kod većine izvora zabilježeni su u prvoj polovini godine, odnosno u zimskim i proljetnim mjesecima. Zimski maksimumi uvjetovani su snježnim padalinama, čiji se pokrivač u ove dvije godine na promatranom području zadržavao tek nekoliko dana. Često su sniježne padaline bile povezane i s kišnjima. Proljetni maksimumi vjerojatno su rezultat intenzivnijih kišnih padalina u svibnju i lipnju, dok je u travnju prisutna kombinacija kišnih događaja i relativno dobro popunjenih vodonosnika topljenjem snijega. Ovakve pretpostavke potrebno je potvrditi daljnjim detaljnim praćenjem, po mogućnosti kontinuiranim, kako je to djelomično ostvareno i na Jambrišakovom vrelu. Praćenje na Jambrišakovom vrelu pokazalo je kako protok izvora u dobroj mjeri prati oborine, odnosno vrlo brzo reagira povećanjem protoka (Sl. 4.7.2.1). To ukazuje na nagle promjene hidroloških obilježja izvora, sukladno bujičnim obilježjima medvedničkih potoka. Idući korak koji bi to potvrdio je analiza povezanosti podataka protoka s Jambrišakovog vrela s protocima medvedničkih potoka. Pojedina istraživanja već su pokazala podudarnost protoka izvora i potoka (Mostowik i dr., 2021). Ta analiza nije učinjena na području Medvednice zbog trenutne nedostupnosti podataka. Vrijednosti EC koje su kontinuirano praćene u

Jambrišakovom vrelu također su pokazale relativno nagli pad s porastom protoka, odnosno količinom padalina (Sl. 4.7.3.7).

Analiza povezanosti izmjerenih vrijednosti protoka između izvora pokazala je kako svi izvori imaju međusobno pozitivnu korelaciju. Međutim, rezultate treba uzeti s oprezom zbog relativno malog broja mjerenja na iste datume. Također, relativno slabiji rezultati korelacije protoka ostalih izvora s kontinuiranim podacima protoka na Jambrišakovom vrelu ipak ukazuju (uz ostale rezultate) da njihovi mehanizmi otjecanja nisu slični. Zbog toga je teško s velikom pouzdanošću primijenti podatke s Jambrišakovog vrela na ostale praćene izvore (Tab. 4.7.2.3). Također, ti rezultati ukazuju na potencijalne lokalne razlike u količini padalina, što može biti jedan od uzroka različitosti u protoku.

Praćenje izvora također je pokazalo da se izvori značajno razlikuju i po varijabilnosti svojih obilježja, čak i kada se nalaze vrlo blizu jedan drugome. Praćenje susjednih krških izvora Jambrišakovo vrelo i Mali Jambrišak pokazalo je njihove različitosti u varijabilnosti, ali i ovisnosti fizikalno-kemijskih obilježja o protoku. Te razlike ukazuju na različite hidrogeološke mehanizme istjecanja vode na površinu. Pretpostavka je da u slučaju Jambrišakovog vrela voda koja se procjeđuje nakon padalinskih događaja relativno naglo dospjeva do izvora i putem razrjeđuje podzemnu vodu u jednom dijelu vodonosnika (vjerojatno na višoj razini). Zbog tog razrjeđivanja dolazi do pada vrijednosti pH i EC s porastom protoka. U slučaju susjednog izvora, Mali Jambrišak, vrijednosti EC su gotovo konstantne, s vrlo malim promjenama. On se nalazi na nižoj nadmorskoj visini i vjerojatno odvodnjava dublji dio vodonosnika u kojem se voda dulje zadržava i koji nije pod velikim utjecajem razrjeđivanja padalinama, odnosno procjednom vodom. Jedno od objašnjenja ovih razlika može biti i da se radi o dva odvojena vodonosnika, odnosno o visećem vodonosniku u slučaju Jambrišakovog vrela. Viseći vodonosnik odvojen je od temeljnice okolnog prostora slojem nepropusnog materijala (Bonacci i Roje-Bonacci, 2000). Također jedno od objašnjenja moglo bi biti da je u slučaju Malog Jambrišaka prisutna neka vrsta takozvanog *Piston flow* mehanizama otjecanja. U takvom sustavu oborinska voda koja ulazi u podzemlje istiskuje podzemnu vodu koja se ondje dulje zadržala te ona izlazi kroz izvor. Zbog toga nema promjene u vrijednostima EC vode bez obzira na promjenu protoka (Sukhija B.S., 2003; Mostowik i dr., 2021). Za potvrdu obje navedene pretpostavke potrebna su daljnja istraživanja. Razlike u rasponu izdašnosti (varijabilnosti protoka) vjerojatno su uvjetovane općenitim kapacitetom izlaznog otvora izvora. Jambrišakovo

vrelo spiljskog je tipa s morfološki velikim kanalom kroz koji voda otječe te može ispuštati puno veće količine vode (Sl. 5.7.1) nego što je to u slučaju Malog Jambrišaka.



Sl. 5.7.1. Istjecanje vode na Jambrišakovom vrelu za vrijeme vrlo visokih vodostaja (18. siječnja 2023.)

Zanimljivo je usporediti drugi par susjednih izvora kod kojih su primijećeni drugačiji odnosi. Izvori Mali i Mini, u izvorištu Malog potoka također su pokazali značajne razlike u hidrološkim obilježjima, točnije u varijabilnosti protoka te u fizikalno-kemijskim obilježjima vode. Na njihovom području nema krškog reljefa već je to prostor tipičnog fluviudenudacijskog tipa reljefa. Izvor Mali pokazao je manje varijabilnosti protoka, kao i EC, pH i temperature. Zanimljivo je što je u ovom slučaju varijabilniji izvor na nižoj nadmorskoj visini od onog relativno stabilnijeg. Pretpostavka je da ta dva izvora imaju zajednički vodonosnik zbog čega razlike ne bi trebale biti velike. Međutim, terenski je putem morfoloških indikatora ustanovljeno kako se tijekom i nakon oborina dio vode površinski i plitko u podzemlju odvodnjava od uzvodnog dijela prema izvoru Mini. U tom slučaju

izvor Mali nalazi se izvan tog puta. To potvrđuje i povremeni izvor koji se javlja dvadesetak metara uzvodno od ova dva izvora i čija voda otječe u smjeru izvora Mini, ali u većini slučajeva ponovno ponire prije planinarske staze (Sl. 5.7.2). Unatoč poniranju, na terenu je jasno vidljiv smjer površinskog (a vjerojatno i plitkog podzemnog) otjecanja vode (Sl. 5.7.2).



Sl. 5.7.2. Izvorišno područje i položaji izvora Mali i Mini s ucertanim smjerovima površinskog otjecanja u vrijeme vrlo visokih voda

Što se tiče varijacija u vrijednostima EC, ona je objašnjena analizom kationa i aniona izvorske vode. Naime uočene su neuobičajeno visoke vrijednosti Na^+ i Cl^- iona. Kako je već ranije opisano, njihovo porijeklo je sol koja se koristi prilikom tretiranja prometnica radi sprječavanja zaleđivanja. Budući da se cesta nalazi uzvodno od izvora Mali i Mini, odnosno unutar njenog topografskog slijevnog područja, ta sol prvo dopire u tlo (Jurišić i dr., 2015; Bulić, 2016), a potom bude isprana padalinama prema izvorima i u njihov vodonosnik. Zbog prisutnosti natrijevih i kloridnih iona EC veća je od prirodne. Slična situacije je i kod obližnjeg Kraljičinog zdenca, gdje su zabilježene cijelu

godinu visoke vrijednosti EC, odnosno natrijevih i kloridnih iona (Tab. 4.7.3.1; 4.7.3.2; 4.7.3.3). Sam izvor nalazi se tek metar ispod prometnice Prilaz Kraljičinom zdencu što prema dobivenim rezultatima predstavlja pritisak na kvalitetu vode. Blizina prometnice i kapacitet vodonosnika vjerojatno uzrokuju cjelogodišnje zadržavanje iona natrija i klora u vodonosniku, međutim to je potrebno potvrditi dodatnim istraživanjima. Svakako je potrebno buduće praćenje ovog izvora te kontrola kvalitete vode budući da brojni planinari svakodnevno koriste vodu ovog izvora za piće, iako prema jednom uzorkovanju (Dekić i Hrenović, 2017) ona ne zadovoljava mikrobiološke standarde pitkosti vode za piće. Također je potrebno promotriti uzroke obližnjih ugostiteljskih objekata.

Procijenjene veličine slijevnih područja praćenih izvora na temelju izračuna vodne bilance pokazale su određeno odstupanje od topografskih slijevnih područja istih izvora određenih u GIS okruženju. U slučaju Jambrišakovog vrela i Malog Jambrišaka pretpostavljeno je da imaju zajednički vodonosnik zbog njihove blizine i sličnosti u fizikalno-kemijskim obilježjima prilikom nižih voda. Izračunata površina od gotovo 93 000 m² vjerojatno je i veća, zbog toga što postoje i ostali izvori u relativno bliskom okruženju kroz koje se također odvodnjava isti vodonosnik.

Površina slijevnog područja izvora Mali i Mini dobivena izračunom vodne bilance (84 000 m²) manja je od topografske slijevne površine dobivene u GIS-u (127 000 m²). Najvjerojatnije objašnjenje je to da se dio topografskog slijevnog područja koji se nalazi iznad ceste Prilaz Kraljičinom zdencu ne odvodnjava prema izvorima. Put te vode vjerojatno je prepriječen izgrađenom cestom i kanalima za odvodnju oborinske vode koji ju prate.

Kod izvora Kraljičin zdenac te Karlovog izvora topografska slijevna površina izračunata u GIS-u višestruko je manja nego ona dobivena preko izračuna vodne bilance. Točnije, prema vodnoj bilanci Kraljičin zdenac ima 3 puta veću slijevnju površinu od one topografske, a Karlov izvor dvostruko veću. To ukazuje na nepoklapanje topografskih i (hidro)geoloških odnosa ovog prostora. Za određivanje točne površine i granica slijevnih područja praćenih izvora potrebna su daljnja praćenja i detaljnija hidrogeološka istraživanja.

Laboratorijska analiza praćenih izvora i još nekoliko dodatnih pokazala je kako voda svih analiziranih izvora, osim izvora Slani, pripadaju kalcijsko-bikarbonatni (Ca-HCO₃) tipu, što odgovara rezultatima prethodnih analiza podzemnih voda Medvednice (Brkić i Čakarun, 1998b;

Slišković i Šarin, 1999b). Udio hidrogenkarbonatnih iona u vodi najveći je kod izvora Jambrišakovo vrelo i Mali Jambrišak, što se objašnjava topivim trijaskim karbonatima u njihovom vodonosniku. U slučaju ostalih izvora, karbonatni ioni ukazuju na prisustvo mramoriziranih paleozojskih vapnenaca i bazalnih konglomerata u vodonosnoj podlozi (Slišković i Šarin, 1999b). Izvor Slani pripada kalcijsko-sulfatnom tipu, zbog lokalnih prisutnosti gipsa te zbog visokog udjela otopljenih minerala pripada mineralnom izvorima.

6. ZAKLJUČCI

Kabinetskim i terenskim radom u razdoblju od srpnja 2020. do ožujka 2024. na prisojnoj strani PP Medvednica kartirano je ukupno 900 izvora i stvorena je geoprostorna baza podataka. Istraživanjem su otkriveni mnogobrojni izvori, višestruko više njih od prethodno navođenog broja u različitim izvorima što predstavlja znanstveni doprinos i praktični doprinos ovog rada. Time je potvrđena prva hipoteza (H1) kojom se pretpostavlja da se na istraživanom području nalazi višestruko veći broj izvora od prethodno smatranog te je izradom digitalne baze podataka zadovoljen prvi cilj istraživanja.

Druga hipoteza (H2), kojom se pretpostavlja da se izvori najveće izdašnosti nalaze na nadmorskim visinama iznad 600 metara nadmorske visine, ovim istraživanjem je odbačena. Istraživanje je pokazalo kako se najveći broj najizdašnije kategorije izvora zapravo nalazi na nadmorskim visinama ispod 600 metara, kako u apsolutnom broju, tako i udjelom najizdašnijih kategorija u ukupnom broju izvora.

Treća hipoteza (H3) također je ovim istraživanjem odbačena. Njome je pretpostavljeno da više od 80 % izvora ima prosječnu izdašnost manju od 0,1 L/s. Od svih izvora kojima je procijenjena izdašnost, njih 64,81 % ima izdašnost manju od 0,1 L/s. Za 127 istraživanih izvora nije određena kategorija izdašnosti. U slučaju da svih 127 neklasificiranih izvora ima izdašnost manju od 0,1 L/s, njihov ukupan udio bio bi 69,78 %, te bi hipoteza H3 i dalje bila odbačena.

Četvrta hipoteza (H4) odnosila se na tipologiju izvora. Njome je pretpostavljeno kako se više od 80 % izvora može svrstati u reokreni i helokreni tip. Izvori su klasificirani prema klasama izdašnosti, prema osnovnoj podjeli na stanišne/morfološke tipove te su klasificirani prema svojem položaju prema mreži otjecanja. Osim navedenog, predložena je i klasifikacija prema hidrogeomorfološkim tipovima, nastala na temelju specifičnih obilježja istraživanih izvora. Najveći broj izvora izdašnosti je između 0,01 i 0,1 L/s. Reokreni i helokreni tipovi dominantni su na području Medvednice uz prijelazne oblike između ta dva tipa. Prema podjeli na osnovne stanišne tipove izvora, hipoteza kojom se pretpostavlja da više od 80 % izvora pripada helokrenom ili reokrenom tipu je potvrđena, budući da je više od 95 % izvora svrstano u te tipove. Prema predloženoj hidrogeomorfološkoj tipizaciji izvora njih 68 % svrstano je u helokreni i reokreni tip izvora, međutim još 26 % njih svrstano je u prijelazne izvore između ta dva tipa. Time je potvrđeno kako većina medvedničkih izvora ima obilježja reokrenih i helokrenih izvora. Desetak izvora vrlo su specifičnih obilježja te su zbog toga svrstani u zasebne tipove, što ukazuje na njihovu posebnost i značaj u smislu hidrološke i geomorfološke raznolikosti. Dodatno, po prvi put je

upotrebljena klasifikacija izvora prema položaju u odnosu na hidrografsku mrežu. Takva podjela je jednostavna za korištenje, a ima potencijala za korištenje prilikom istraživanja geomorfoloških obilježja, procesa i evolucije područja s izraženim fluviudenudacijskim reljefom, kao i prilikom hidrogeoloških istraživanja.

Peta hipoteza (H5) djelomično je potvrđena. Njome se pretpostavilo kako izvori koji su pod antropogenim utjecajem imaju veću varijabilnost fizikalno-kemijskih obilježja od izvora s manjim pritiskom. U ovom istraživanju kao glavni antropogeni pritisak navedene su asfaltirane prometnice koje se u hladijem dijelu godine tretiraju sredstvima protiv zaljeđivanja (sol). Istraživanje je pokazalo značajno veće vrijednosti EC izvora uz prometnice u odnosu na ostale izvore. Također, laboratorijskom analizom praćenih izvora ustanovljene su povećane količine natrijevih i kloridnih iona, odnosno iona koji nastaju otapanjem kuhinjske soli (NaCl). Na praćenim izvorima u blizini ceste, posebno u slučaju izvora Mini na Malom potoku utvrđene su velike varijacije vrijednosti EC uzrokovane upravo otapanjem kuhinjske soli. Dakle, potvrđen je antropogeni utjecaj na promjene fizikalno-kemijskih obilježja, međutim varijacije u njihovim vrijednostima utjecane su i prirodnim obilježjima izvora. Zbog toga su moguće i relativno velike prirodne varijacije u fizikalno-kemijskim obilježjima bez antropogenog utjecaja, što je primjerice potvrđeno praćenjem izvora Jambrišakovo vrelo.

Istraživanje je također znanstveno doprinjelo i drugim rezultatima te su otvorena nova pitanja za daljnja istraživanja. Jedan od ciljeva bio je utvrditi neke prostorne zakonitosti, odnosno povezanost izvora s prostornim morfometrijskim i geološkim obilježjima.

Istraživanjem je dokazana povezanost rasjeda i geoloških lineamenata općenito s pojavnošću izvora. Unatoč relativno grubom mjerilu geoloških podataka, dokazano je kako se najveći broj izvora nalazi na udaljenosti do 100 metara od poznatih rasjeda i geoloških lineamenata. Također je ustanovljeno relativno dobro poklapanje gustoća rasjeda i geoloških lineamenata s gustoćama izvora. Ta povezanost izvora i rasjeda uvjetuje i orijentaciju izvora, naravno uz opću nagnutost prostora istraživanja. Budući da se izvori javljaju uzduž rasjeda, njihova orijentacija najčešće je okomita na smjer pružanja rasjeda.

Raspored izvora prema nadmorskim visinama zapravo je posljedica nagiba padina i vertikalne raščlanjenosti prostora. Pokazano je kako se izvori najčešće javljaju na padinama s nagibom između 12° i 32° , odnosno još preciznije, na padinama nagiba od 20° do 25° . Na tim padinama zabilježen je njihov najveći broj, ali i gustoća. Pokazalo se također kako se izvori najčešće javljaju na prostorima s

vrijednošću vertikalne raščlanjenosti oko prosjeka, odnosno na prostorima gdje postoji relativna ravnoteža procesa denudacije i akumulacije materijala.

Također je utvrđeno da je veći broj i gustoća izvora na konvergentnim padinama u slučaju poprečne zakrivljenosti, odnosno konveksnim padinama u slučaju uzdužne zakrivljenosti. Vrijednost Indeksa topografske vlažnosti (TWI) iznad koje se javljaju izvori je ovim istraživanjem određen kao 2,64. S porastom vrijednosti navedenog indeksa postupno raste i gustoća izvora, sve do vrijednosti između 9 i 10, nakon koje naglo pada. Najveći broj izvora pronađen je na područjima s vrijednošću TWI između 5 i 6.

Statistička analiza varijanci (ANOVA) navedenih prostornih obilježja pokazala je kako su nagib padina i udaljenost od rasjeda dva obilježja prema kojima se najviše razlikuju izvori različitih kategorija izdašnosti izvora.

Naravno, osim navedenih obilježja, i hidrogeološka obilježja različitih stijena imaju vrlo bitnu u prostornom rasporedu i izdašnosti izvora. To su potvrdili i rezultati ovog istraživanja. Najveći broj izvora zabilježen je na prostoru devonskih i karbonskih metamorfnih stijena (parametamorfiti i ortometamorfiti), što je logično jer zauzimaju najveće površine. Relativno gledano, iznadprosječne gustoće izvora ($> 10,53$ izvora/km²) imali su prostori litostratigrafskih jedinica paleogenskih konglomerata, pješčenjaka i lapora, devonskih i karbonskih parametamorfita, na području karbonatnih stijena srednjeg trijasa te na područjima gornjokrednih breča, konglomerata i vapnenaca.

Najveći broj najizdašnijih izvora (>1 L/s) zabilježen je na području devonskih i karbonskih parametamorfita i ortometamorfita. Najveći udio najizdašnijih izvora zabilježen je na prostoru miocenskih konglomerata, šljunaka i pijesaka. Najveći broj izvora najslabije izdašnosti ($< 0,01$ L/s) pronađen je na području devonskih i karbonskih parametamorfih stijena te na području gornjokrednih breča, konglomerata i vapnenaca. Na prostorima potonje litostratigrafske jedinice zabilježen je i njihov najveći udio. Najslabiji izvori u potpunosti su izostali s litostratigrafskih jedinica srednjetrojaskih karbonata te paleogenskih konglomerata, pješčenjaka i lapora. Osim po svojoj izdašnosti, pokazalo se kako se izvori različitih litostratigrafskih jedinica razlikuju i po fizikalno-kemijskim obilježjima. Najmanje varijacije u vrijednostima EC i pH pokazali su izvori na područjima stijena s relativno dobrom propusnošću, odnosno na području srednjetrojaskih karbonata i miocenskih litotamnijskih vapnenaca.

Općenito, dobiveni rezultati temperatura izvorske vode, odnosno njihovih amplituda ukazuju na plitko podzemno otjecanje i procjeđivanje. Nije ustanovljena prisutnost termalnih izvora unutar granica istraživanog područja. EC je vrlo raznolika te je posljedica različitih prirodnih, ali i antropogenih uvjeta i utjecaja, od kojih se ističe tretiranje prometnica sredstvima protiv zaleđivanja (sol). Različite vrijednosti pH posljedica su mnogih prirodnih čimbenika i procesa te antropogenog utjecaja.

Izvori Medvednice su mnogobrojni i većinom slabije izdašnosti. Međutim, to ne umanjuje njihovu važnost iz hidrološkog aspekta, kao ni iz perspektive georaznolikosti te njihove ekološke važnosti. Iako pojedinačna hidrološka važnost izvora nije velika, njihovo skupno djelovanje većinom je odgovorno za nastanak medvedničkih potoka koji su gotovo svi aktivni i u najsušim razdobljima. Prema Planu upravljanja PP Medvednica (2009), izvori bi trebali biti prostori posebne zaštite. Nažalost, na terenu je vidljivo kako je velik broj izvora onečišćen otpadom, a često su i morfološki izmijenjeni pod utjecajem teških šumarskih strojeva. Nastavkom geokoloških istraživanjima mogli bi se utvrditi izvori od značajne važnosti te predložiti zaštita pojedinih izvora kao posebnih geolokaliteta i/ili geobaštine. Dobar primjer takvih izvora su izvor Jambrišakovo vrelo ili Karlov izvor (Gračec).

Ovakvo istraživanje može poslužiti kao osnova za buduća istraživanja različitih znanosti i disciplina. Primjerice, iako to nije bio predmet istraživanja, u izvorima su uočeni mnogi biljni i životinjski organizmi, kao što su pjegavi daždevnjak, potočni rak te brojni makrobekralješnjaci, koji mogu poslužiti kao indikatori ekološkog stanja. Istraživanje bioraznolikosti i ekološke uloge medvedničkih izvora sigurno bi pridonijelo njihovoj boljoj zaštiti. Podaci o izdašnosti izvora i njihovom prostornom rasporedu dobra su osnova za detaljnija geološka i hidrogeološka istraživanja, dok bi kontinuirano praćenje hidroloških obilježja bilo važno za hidrološko modeliranje izvora i potoka Medvednice. Takvi modeli bili bi korisni za sustav obrane od poplava šireg prostora grada Zagreba.

Na koncu, ovo istraživanje primjer je mogućeg metodološkog pristupa detaljnom istraživanju izvora planinskih područja koje bi se moglo primjenjivati na otočnim gorjima Hrvatske, ali i šire. Prvi korak bio bi kartiranje izvora ostatka Medvednice, kako bi se dobila cjelovita baza podataka izvora. Istraživanja ovakvog tipa važna su za procjenu hidroloških resursa nekog područja te za lakše upravljanje vodnim resursima i njihovu kvalitetniju zaštitu.

7. LITERATURA I IZVORI

Abele, S.L., 2011: *Nevada Springs Conservation Plan*. Springs Conservation Plan Working Group. The Nature Conservancy, Reno, NV. 61 str.

Agarwal, A., Bhatnaga, N. K., Nema, R. K., Agrawal, Nitin K., 2012: Rainfall Dependence of Springs in the Midwestern Himalayan Hills of Uttarakhand, *Mountain Research and Development* 32 (4), 446-455.

Agren, A.M., Lidberg, W., Strömngren, M., Ogilvie, J., Arp, P.A., 2014: Evaluating digital terrain indices for soil wetness mapping—a Swedish case study. *Hydrology and Earth System Sciences* 18 (9), 3623–3634. doi:10.5194/hess-18-3623-2014.

Alfaro, C., Wallace, M., 1994: Origin and classification of springs and historical review with current applications, *Environ. Geol.* 24, 112-124.

Alley, W.M., Reilly, T.E., Franke, O.L., 2007: Sustainability of Ground-Water Resources. *Circular 1186*, Washington, DC: U.S. Geological Survey.

Antić, A., Tomić, N., Marković, S., 2019: Karst geoheritage and geotourism potential in the Pek River lower basin (eastern Serbia). *Geographica Pannonica* 23 (1), 32-46, <https://doi.org/10.5937/gp23-20463>.

Appelo, C.A.J., Postma, D., 2005: *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, 2. izdanje, CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781439833544>

Baechler, F. E., Cross, H. J., Baechler, L., 2019: The geology and hydrogeology of springs on Cape Breton Island, Nova Scotia, Canada: an overview. *Atlantic Geoscience*, 55, 137–161. <https://doi.org/10.4138/atlgeol.2019.004>

Bakalowicz, M., 2005: Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeology Journal*, 13, pp. 148–160. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0402-9>

Baker, V. R., Kochel, R. C., Laity, J. E., Howard, A. D., 1990: Spring sapping and valley network development. In *Groundwater Geomorphology; The Role of Subsurface Water in Earth-Surface Processes and Landforms* (ur. Higgins, C.G. i Coates, D.R.), Geological Society of America, Boulder, Colorado, USA, Vol. 252, pp. 235-265. <https://doi.org/10.1130/SPE252-p235>

- Baldrwin, H.L., McGuinness, C.L., 1963: *A primer on ground water*. US Government Printing Office, Washington, SAD. 26 str.
- Basch, O., 1981: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100,000, List Ivanić Grad L33–81. Geološki zavod Zagreb, OOUR za geologiju i paleontologiju, Redakcija i izdanje Saveznog geološkog zavoda Beograd.
- Basch, O., 1983: *Osnovna geološka karta SFRJ 1:100,000, Tumač za list Ivanić Grad L33–81*. Geološki zavod Zagreb, Savezni geološki zavod, Beograd.
- Baučić, I., 1967: Cetina – razvoj reljefa i cirkulacija vode u kršu. *Acta Geographica Croatica* 6 (1), 5-167.
- Belak, M., Slovenec, D., Kolar Jurkovšek, T., Garašić, V., Pécskay, Z., Tibljaš, D. & Mišur, I., 2022: Low-grade metamorphic rocks of the Tethys subduction–collision zone in the Medvednica Mt. (NW Croatia). *Geologica Carpathica*, 73. (3), 207-229. doi: 10.31577/GeolCarp.73.3.3
- Bense, V.F., Gleeson, T., Loveless, S.E., Bour, O., Scibek, J., 2013: Fault zone hydrogeology. *Earth Science Reviews*, 127, 171–192. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.09.008>
- Beven, K.J., Kirkby, M. J., 1979: A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Science Bulletin*, 24 (1), pp. 43–69. doi:10.1080/02626667909491834
- Bikse J., Gavinolla, M. R., 2021: Water Springs as a Resource for Nature Tourism in Latvia: a Tourist Perspective, In: *Environment. Technology. Resources. Proceedings of the 13th International Scientific and Practical Conference*, Volume 1.
- Birk, S., Hergarten, S., 2012: Estimation of aquifer parameters from the recession of spring hydrographs – Influence of flow geometry, *Geophysical Research Abstracts* 14, EGU General Assembly 2012.
- Biondić, B., Brkić, Ž., Biondić, R., 2003: Hidrogeološka karta Republike Hrvatske 1:300 000. Institut za geološka istraživanja Zagreb, Zavod za hidrogeologiju i inženjersku geologiju.

- Biondić, B., Goatti, V., Vulić, Z., 1979: Hydrogeological investigation of watershed Rjecina spring, Grobnicko polje, Zvir and Martinscica. *Proceedings of the 1st Intern. Symp. about Groundwater*, UNDP, 61-69, Zagreb.
- Biondić, B., Zojer, H., Biondić, R., Yehdego, B., Kapelj, S., Meaški, H., Zwiker, G., 2008: *Održivo korištenje i zaštita vodnih resursa na području Plitvičkih jezera – Završno izvješće*, Geotehnički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 129.
- Bioportal, WMS servis zaštićenih područja RH, <https://services.bioportal.hr/wms>
- Bočić, N., Buzjak, N., 1998: Speleomorphology of dry passage in Provala cave (Croatia). *Acta carsologica XXVII/2*, 25–40, Postojna.
- Bognar, A., 2001: Geomorfološka regionalizacija Hrvatske, *Acta Geographica Croatica*, 34, 7-29.
- Boljat, I., Terzić, J., Duić, Ž., Lukač Reberski, J., Selak, A., Briški, M., 2024: Tracing hydrological processes: insights from hydrochemical and isotopic investigations in the northern part of Croatian Dinaric karst. *Geologia Croatica* 77 (2), 127-144. DOI: <https://doi.org/10.4154/gc.2024.09>
- Bonacci, O., 1985: Hydrological investigations of Dinaric Karst at the Krčić catchment and the river Krka springs (Yugoslavia). *Journal of Hydrology* 82, 317-326.
- Bonacci, O., 1993: Karst springs hydrographs as indicators of karst aquifers, *Hydrological Sciences Journal* 38 (1), 51-62, DOI: 10.1080/02626669309492639.
- Bonacci, O., 1996: Hydrology of the Gradole Karst Spring (Istria-Croatia)//Hidrologija kraškega izvira Gradole (Istra-Hrvaška). *Acta Karstologica XX*, 45-55.
- Bonacci, O., 1999: Water circulation in karst and determination of catchment areas: example of the River Zrmanja, *Hydrological Sciences Journal* 44 (3), 373-386, DOI: 10.1080/02626669909492233.
- Bonacci, O., 2001: Analysis of the maximum discharge of karst springs. *Hydrogeology Journal* 9, 328-338, <https://doi.org/10.1007/s100400100142>.
- Bonacci, O., 2018: Prilog hidrologiji krškog izvora vrelo Une, *Hrvatske vode* 26, 119-128.
- Bonacci, O., Andrić, I., 2008: Sinking karst rivers hydrology: case of the Lika and Gacka (Croatia). *Acta Carsologica* 37 (2), 185-196.

Bonacci, O., Bojanić, D., 1991: Rhythmic karst springs, *Hydrological Sciences Journal* 36 (1), 35-47, DOI: 10.1080/02626669109492483.

Bonacci, O., Buzjak, N., Roje-Bonacci, T. 2016: Changes in hydrological regime caused by human intervention in karst: the case of the Rumin Springs, *Hydrological Sciences Journal* 61 (13), 2387-2398, DOI:10.1080/02626667.2015.1111518.

Bonacci, O., Magdalenić, A., 1993: The Catchment Area of the Sv. Ivan Karst Spring in Istria (Croatia). *Groundwater* 31, 767-773, <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1993.tb00849.x>.

Bonacci, O., Oštrić, M., Roje-Bonacci, T., 2017: Prilog hidrologiji krškog izvora Rječine, *Hrvatske vode* 25, 99-108.

Bonacci, O., Roje-Bonacci, T., 2000: Posebnosti krških vodonosnika. *Hrvatske vode* 8 (30), 25-42.

Bornhauser, K., 1913: Der Tierwelt der Quellen in der Umgebung Basels Hydrobiologie. Internationale Revue der gesamten hydrobiologie. Biologische Supplement 5, 1-90.

Božičević, S., 1973: Contribution to the hydrogeology of the Rječina spring. *Geološki vjesnik* 25, 277-283.

Božičević, S., 1974a: Morphology of the Rječina spring water channels. *Geološki vjesnik* 27, 273-281.

Božičević, S. 1974b: Podzemni krški fenomeni planine Medvednice kraj Zagreba. *Acta carsologica*, 6, 97-109, Ljubljana

Božičević, S. 1976: Hidrologija pećine Veternice kraj Zagreba na planini Medvednici. U: 8. *jugoslavenski geološki kongres, Zbornik radova*, Ljubljana, Yugoslavia, 1976. 4, pp. 5–12.

Brands, E., Rajagopal, R., Eleswarapu, U. and Li, P., 2017: Groundwater. U: *International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology* (ur. Richardson, D., Castree, N., Goodchild, M.F., Kobayashi, A., Liu W., Marston, R.A.). AAG, SAD. 3237-3253. <https://doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg0677>

Briški, M., Stroj, A., Kosović, I., Borović, S., 2020: Characterization of Aquifers in Metamorphic Rocks by Combined Use of Electrical Resistivity Tomography and Monitoring of Spring Hydrodynamics. *Geosciences* 2020; 10(4):137. <https://doi.org/10.3390/geosciences10040137>

Brkić, Ž., Čakarun I., 1998a: Osnovna hidrogeološka karta Hrvatske 1:100 000, list Zagreb. Institut za geološka istraživanja Zagreb, Zavod za hidrogeologiju i inženjersku geologiju.

Brkić, Ž., Čakarun I., 1998b: *Osnovna hidrogeološka karta Hrvatske 1:100 000, list Zagreb - Tumač*. Institut za geološka istraživanja Zagreb, Zavod za hidrogeologiju i inženjersku geologiju.

Brletić, F., 2017: Hidrološki objekti na jugozapadnim obroncima Parka prirode Medvednica. Rad za Rektorovu nagradu. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu. 67 str.

Bryan, K., 1919: Classification of Springs, *Journal of Geology* 27 (7), 522-561.

Buczyński, S., Rzonca, B., 2011: Effects of crystalline massif tectonics on groundwater origin and catchment size of a large spring area in Zieleniec, Sudety Mountains, southwestern Poland. *Hydrogeology Journal*, 19,1085–1101.

Buczyński S., Rzonca B., 2018: Influence of geologic structure on the presence, discharge and physical and chemical properties of springs in the Muszynka catchment (Carpathian flysch). *Episodes*, 48, 89-96, <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2018/018012>.

Bulić, M., 2016: Kemijske značajke tla u PP Medvednica s obzirom na primjenu soli u zimskim uvjetima održavanja ceste. Diplomski rad. Agronomski fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

Buzjak, N., 2001: Geomorfološka analiza polja u kršu Ponikve (Medvednica). E-škola geografije. <https://antares.geog.pmf.hr/eskola/index.php/2021/11/27/geomorfoloska-analiza-polja-u-krsu-ponikve-medvednica/> (preuzeto 12.9.2023.)

Buzjak, N., 2011: Samobor - krški i fluviokrški reljef, u: *Samobor, Zemljopisno-povijesna monografija* (ur. Feletar, D.), Meridijani, Samobor.

Buzjak, N. 2018: Geotouristic potential of caves – example of Veternica Cave (Medvednica Nature Park, Croatia). U *Proceedings of the 12th EuroSpeleo Forum* (Mattes, J., Christian, E., Plan, L., ur.) Neukirchen: Verein für Höhlenkunde Ebensee, Austria, pp. 38-41.

Cantonati, M., Stevens, L. E., Sagadelli, S., Springer, A. E., Goldscheider, N., Celico, F., Filippini, M., Ogata, K., Gargini, A., 2020: Ecohydrogeology: The interdisciplinary convergence needed to improve the study and stewardship of springs and other groundwater-dependent habitats, biota and ecosystems, *Ecological indicators* 110, 1-15.

Cantonati, M., Fensham, R. J., Stevens, L. E., Gerecke, R., Glazier, D. S., Goldscheider, N., Knight, R. L., Richardson, J. S., Springer, A. E. and Tockner, K., 2021: Urgent plea for global protection of springs. *Conservation Biology* 35, 378-382. DOI: 10.1111/cobi.13576.

Cervi, F., Marcaccio, M., Petronici, F., Borgatti, L., 2014: Hydrogeological characterization of peculiar Apenninic springs. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences* 364, 333-338. DOI:10.5194/piahs-364-333-2014.

Chen, W., Li, Y., Tsangaratos, P., Shahabi, H., Ilia, I., Xue, W., Bian, H., 2020: Groundwater Spring Potential Mapping Using Artificial Intelligence Approach Based on Kernel Logistic Regression, Random Forest, and Alternating Decision Tree Models. *Applied Sciences* 10(2):425. <https://doi.org/10.3390/app10020425>

Chow, V.T., Maidment, D.R. and Mays, L.W., 1988: *Applied Hydrology*. International Edition, McGraw-Hill Book Company, New York.

Cieżykowski, W., Schmalz, A., Żak, S., 2001: Charakterystyka krenologiczna zlewni Kryniczanki w Beskidzie Sądeckim. *Współczesne Problemy Hydrogeologii*, v. 10, pp. 141–148.

Clark, I., 2015: *Groundwater Geochemistry and Isotopes*, CRC Press, Boca Raton, Florida. <https://doi.org/10.1201/b18347>

Clarke, F. W., 1924: *The data of geochemistry*, Government Printing Office, Washington, D.C. USGS, 181-217.

Corsini, A., Cervi, F., Ronchetti, F., 2009: Weight evidence and artificial neural networks for potential groundwater spring mapping: an application to the Mt. Modino area (Northern Apennines, Italy). *Geomorphology* 111, 79-87.

Crnković, G., Gobin, I., 2013: Mikrobiološka ispravnost prirodne izvorske vode u odabranim izvorima na području Gorskog kotara. *Hrvatske vode: časopis za vodno gospodarstvo* 21 (83), 17-24.

Culver, D.C., Pipan, T., Gottstein, S., 2006: Hypotelminorheic - A Unique Freshwater Habitat. *Subterranean Biology* 4, 1-7.

Čanjevac, I., Orešić, D., 2020: Surface Water Resources and Their Management in Croatia. U: Negm, A., Romanescu, G., Zelenáková, M. (ur.): *Water Resources Management in Balkan Countries*. Heidelberg, Springer International Publishing, 159-174.

Dadić, Ž., 2003: *Priručnik o temeljnoj kakvoći vode u Hrvatskoj*. Zagreb: Hrvatski zavod za javno zdravstvo. 88 str.

Data classification methods. ESRI ArcGIS Pro. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/mapping/layer-properties/data-classification-methods.htm> (27.5.2024.)

Dekić, S., Hrenović, J., 2017: Bakteriološka analiza izvorske vode uz najpoznatija izletišta Parka prirode Medvednica. *Hrvatske vode* 25 (99), 13-16.

Demek, J., 1972: *Manual and Detailed Geomorphological Mapping*. IGU – Commission on Geomorphological survey and mapping. Czechoslovak Academy of Science, Prague, Czechoslovakia.

de Moura, M.N., Felipe, M.F., 2022: Hydrogeomorphology of Brazilian Springs: Between Diversity and Lack of Knowledge. U: (Barbosa dos Santos, G., Fernandes Felipe, M., Marques Neto, R., ur.) *Geomorphology of Brazil: Complexity, Interscale and Landscape*. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-05178-4_6

Denić-Jukić, V., Lozić, A., Jukić, D., 2020: An Application of Correlation and Spectral Analysis in Hydrological Study of Neighboring Karst Springs. *Water* 12, 3570. <https://doi.org/10.3390/w12123570>.

DGU Geoportal: Podaci i servisi, <https://geoportal.dgu.hr/#/menu/podaci-i-servisi> (20,5.2024.)

Dietrich, W.E., Dunne, T., 1993: The Channel Head. U: *Channel Network Hydrology* (ur. Beven K., Kirkby M.J.), Wiley, New York, 175-219.

DHMZ – Državni hidrometeorološki zavod. Podaci o temperaturi, padalinama i protocima, 2024.

Dietrich, W. E., Dunne, T., 1993: The channel Head, u: Beven, K., i Kirkby, M. J. (ur): *Channel network hydrology*, Chinchester, Wiley, 175-219.

Drinking Water Regulations and Contaminants, United States Environmental Protection Agency (EPA), n.d., <https://www.epa.gov/sdwa/drinking-water-regulations-and-contaminants> (7.5.2024.)

Dotsika, E., Diamantopoulos, G., Lykoudis, S., Poutoukis, D., Kranioti, E., 2018: Isotopic Composition of Spring Water in Greece: Spring Waters Isoscapes. *Geosciences* 8(7):238. <https://doi.org/10,3390/geosciences8070238>

Dukić, D., 1984: *Hidrologija Kopna*, Naučna knjiga, Beograd.

Dunne, T., 1980: Formation and controls of channel networks. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 4 (2), pp. 211-239.

Earle, S., 2015: Groundwater and Aquifers, u: *Physical Geology* (ur. Earle, S.). Victoria, B.C.: BCcampus. <https://opentextbc.ca/geology/>

Emili, H., 1965: Prilog upoznavanju sanitarne vrijednosti izvora i vodotoka u Nacionalnom parku Plitvička Jezera. *Plitvički bilten* 1 (1), 39-51.

Encyclopedia Britannica, 2020. <https://www.britannica.com/science/spring-water> (pristupljeno 27.6.2024.)

Erdelez, A., 2019: *Elaborat zaštite okoliša za ocjenu o potrebi procjene utjecaja na okoliš: Izgradnja akumulacije Krumpirište za potrebe zasneženja skijaških staza na Sljemenu*. Elaborat. Fidon d.o.o., Zagreb, 171 str.

Evans, J.D., 1996: *Straightforward Statistics for the Behavioral Sciences*. Brooks Cole Publishing Company.

Feher, R., Bădăluță, C.A., Brad, T., Drăgan, C., Drăgușin, V., Măntoiu, D.Ș., Perșoiu, A., Tîrlă, M.L., 2024: Stable Isotope Hydrology of Karst Groundwaters in Romania. *Water* 16(11):1489. <https://doi.org/10,3390/w16111489>

Fetter, C. W., 1980: *Applied hydrogeology*. C. E. Merrill, 691.

- Fifty, H. S., Elia, G., Nor Hizami, H., Zulhazman, H., Nordiana, M., Nor Akmar, A., 2021: Evaluation on the Potential of Hot Spring as Nature Tourism Attraction in Lojing Highlands, Kelantan, Peninsula Malaysia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 736.
- Fišić, M., Rubinić, J., Radišić, M., 2018: Hidrološka analiza izvorišnog dijela rijeke Gacke, *Zbornik radova (Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci)* XXI (1), 163-177, <https://doi.org/10.32762/zr.21.1.10>.
- Fiorillo, F. 2014: The Recession of Spring Hydrographs, Focused on Karst Aquifers. *Water Resources Management* 28, 1781-1805, <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0597-z>.
- Florida Geological Survey, 2003: *Florida Spring Classification System and Spring Glossary. Special Publication No. 52*. Tallahassee, SAD.
- Ford, D. C., Williams, P., 2007: *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons. New Jersey, SAD.
- France Voyage: Fountain de Vaucluse, <https://www.france-voyage.com/tourism/fontaine-vaucluse-806.htm> (21. 1. 2022.)
- Franić, D., 1910: *Plitvička jezera i njihova okolica*, Javna ustanova Nacionalni park Plitvička jezera, 2019.
- Freed, Z., Aldous, A., Gannet, M.W., 2019: Landscape controls on the distribution and ecohydrology of central Oregon springs. *Ecohydrology*, 12/2, DOI: 10.1002/eco.2065
- Freeze, R. A., Cherry, J. A., 1979: *Groundwater*, Engteewood Cliffs, N. J. Prentice-Hall, 604.
- Gerecke, R. and Di Sabatino, A., 1996. Water mites (Acari, Hydrachnellae) and spring typology in Sicily. *Crunoecia* 5, 34-41.
- Giacopetti, M., Materazzi, M., Pambianchi, G., Posavec, K., 2017: Analysis of mountain springs discharge time series in the Tennacola stream catchment (central Apennine, Italy). *Environmental Earth Sciences* 76, 20, <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6339-1>.
- Gianfaldoni, S., Tchernev, G., Wollina, U., Rocchia, M. G., Fioranelli, M., Gianfaldoni, R., Lotti, T., 2017: History of the Baths and Thermal Medicine. *Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences* 5 (4), 566-568, <https://doi.org/10.3889/oamjms.2017.126>.

Glazier, D. S., 2014: Springs, u: Elias, S. A. (ur.): *Reference module in Earth Systems and Environmental Sciences*, Elsevier, Waltham, MA, 78.

Gulić, I., 1973: Izvor Gradole – krški fenomen u dolini rijeke Mirne. *Građevinar* 5, 152-161.

HAOP – Hrvatska agencija za zaštitu prirode, 2015: *Analiza pritisaka i prijetnji u Parku prirode Medvednica* (ur. Bijelić, M). Zagreb. 65 str.

Heštera, H., Plantak, M., Gernhardt, D., 2023: Ovisnost različitih algoritama i rezolucija modela visina na topografski indeks vlaženja: analiza in situ mjerenja vlažnosti tla na vojnom poligonu „Gašinci“, U: *Knjiga sažetaka 8. Hrvatskog geografskog kongresa "Geografski odgovori na izazove suvremenog svijeta u 21. stoljeću i obilježavanje 140 godina geografije na Sveučilištu u Zagrebu* (ur. Maradin, M., Vuk, R., Lončar, J.) Zagreb, Hrvatsko geografsko društvo. str. 99-100.

Himmel, J., 1964: Estavela-hidrografický krasový jev. Kras v Čeksovensku, 1. Brno.

Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2013. – 2024. <https://enciklopedija.hr/> (Pristupljeno 27.6.2024.)

Iván, V., Stevenazzi, S., Pollicino, L.C., Masetti, M., Mádl-Szőnyi, J., 2020: An Enhanced Approach to the Spatial and Statistical Analysis of Factors Influencing Spring Distribution on a Transboundary Karst Aquifer. *Water* 12(8):2133. <https://doi.org/10.3390/w12082133>

Jamičić, D. i Slovenec, D., 2002: Tectonic setting of recently found gypsum deposits of Mt. Medvednica (Northwestern Croatia). *Natura Croatica*, 11 (1), 27-51.

Jenkins, D. G., McCauley, L. A., 2006: GIS, SINKS, FILL, and disappearing wetlands: unintended consequences in algorithm development and use. In *Proceedings of the 2006 ACM symposium on Applied computing (SAC '06)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 277–282. <https://doi.org/10.1145/1141277.1141342>

Jurišić, A., Bogunović, I., Vugrek Petljak, K., Bulić, M., Kisić, I., 2015: Utjecaj primjene soli pri održavanju Sljemenske ceste u zimskim uvjetima na kemijske značajke tla u PP Medvednica, u: *Vizija i izazovi upravljanja zaštićenim područjima prirode u Republici Hrvatskoj: aktivna zaštita i održivo upravljanje u Nacionalnom parku 'Krka'* (ur. Marguš Drago), Knjiga sažetaka. Šibenik. str.110-110.

Keilhack, K., 1912: *Lehrbuch der Grundwasser und Quellenkunde*, 3. izdanje. Borntraeger, Berlin.

Kempe, S., Emeis, K., 1985: Carbonate chemistry and the formation of Plitvice Lakes. In: Degens, E. T., Kempe, S., Herrera, R. (eds.), *Transport of carbon and minerals in major world rivers*. Mitteilungen aus dem Geologisch-Paläontologischen Institut der Universität Hamburg, SCOPE/UNEP Sonderbd., 351-583.

Kløve, B., Ala-Aho, P., Bertrand, G., Gurdak, J. J., Kupfersberger, H., Kværner, J. Muotka, T., Mykra, H., Preda, E., Rossi, P., Uvo, C. B., Velasco, E., Pulido-Velazquez, M., 2014: Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. *Journal of Hydrology* 518 (B), 250–266.

Khatri, N., Tyagi, S., 2014: Influences of natural and anthropogenic factors on surface and groundwater quality in rural and urban areas. *Frontiers in Life Science*, 8(1), 23–39.
<https://doi.org/10.1080/21553769.2014.933716>

Knighton, D., 1998: *Fluvial Forms and Processes: A New Perspective*. Routledge.
<https://doi.org/10.4324/9780203784662>

Kottek, K., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F., 2006: World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift* 15, 259-263. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130

Kovács, A., Perrochet, P., 2008: A quantitative approach to spring hydrograph decomposition, *Journal of Hydrology* 352 (1-2), 16-29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.12.009>.

Kranjec, V., 1963: O geologiji okolice Podsuseda s osobitim obzirom na Sutinska vrela. *Geološki vjesnik* 17, Zagreb. 19-35.

Krešić N., 2023: *Hydrogeology 101: Introduction to Groundwater Science and Engineering*. Blue Ridge Press LLC, Warrenton, VA, SAD.

Lasek, J., Dąbek, N., Jaśkowiec, B., Mocior, E., Peek, B., Plenzler, J., Płaczkowska, E., Rzonca, B., Siwek, J., Wójcik, S., 2012: Źródła w Bieszczadach Wysokich (Springs in the High Bieszczady Mountains – in Polish). *Roczniki Bieszczadzkie* 20, pp. 254–267.

- Lovrić, F., Kapelj, S., Loborec, J., 2017: Procjena zaliha pitke vode temeljem hidrogeoloških obilježja na području sjeveroistočnog Prigorja. *Inženjerstvo okoliša*, vol. 4 (1), 25-39.
- Lozić, S., 1995: Vertikalna raščlanjenost reljefa kopnenog dijela Republike Hrvatske. *Acta Geographica Croatica*, vol. 30, 17-28.
- Lozić, S., 1996: Nagib padina kopnenog dijela Republike Hrvatske. *Acta Geographica Croatica*, vol. 31, 41-50.
- Lozić, S., Šiljeg, A., Krklec, K., 2012: Morfometrijske značajke otoka Visa, *Naše more*, 60 (5-6), 110-117.
- Magdalenić, A., Bonacci, O., Jurak, V., 1987: Sliv izvora Bulaž u središnjoj Istri. *Krš Jugoslavije*, 12/1, 1-26, Zagreb.
- Magdalenić, A., Jurak, V., Bonacci, O., 1986: Analysis of Karst Spring, Yugoslavia. *International Symposium on Karst Water Resources*, IAHS Publications, 161, 359-269.
- Magdalenić, A., Vazdar, T. 1993: Hidrogeološka interpretacija trasiranja podzemnih voda u središnjoj Istri. *Hrvatske vode* 1 (4), 231-238.
- Magdalenić, A., Vazdar, T., Hlevnjak, B., 1995: Hydrogeology of Gradole Spring Drainage Area in Central Istria. *Geologia Croatica* 48 (1), 97-106.
- Maksimovič, G., 1969: Osnovi karstovedenja, Tom II. Perm.
- Manga, M., 2001: Using Springs to Study Groundwater Flow and Active Geologic Processes, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 29 (1), 201-228.
- Marković, M. 1983: *Osnovi primenjene geomorfologije*. Geoinstitut. Posebna izdanja 8. Beograd.
- Martin, P., Brunke, M., 2012: Faunal typology of lowland springs in northern Germany, *Freshwater Science* 31 (2), 542-562.
- Martinić, I., Čanjevac, I., 2024: Distribution and Characteristics of Springs in Two Neighboring Areas of Different Morphogenic Relief Type—Example of SW Medvednica Mountain (Central Croatia). *Water*, 16, 994. <https://doi.org/10.3390/w16070994>

Martinić, I., Vinković, K., Płaczowska, E., 2019: Geomorfološko i hidrogeografsko istraživanje Malog i Velikog potoka na Medvednici, u: *7. hrvatski geografski kongres - knjiga sažetaka* (ur. Orešić, D., Lončar, J., Maradin, M.). Zagreb, Hrvatsko geografsko društvo, str. 57-60.

Mazurek, M., 2011: Geomorphological processes in channel heads initiated by groundwater outflows (The Parsęta catchment, north-western Poland). *Quaestiones Geographicae*, 30 (3), pp. 33-45.

Meaški, H., 2011: *Model zaštite krških vodnih resursa na primjeru Nacionalnog parka Plitvička jezera*, doktorska disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.

Meaški, H., Biondić, R., Loborec, J., Leskovar, K., 2019: Krški izvori u Varaždinskoj županiji u: Biondić, D., Holjević, D., Vizner, M. (ur.): *Zbornik radova 7. hrvatske konferencije o vodama*, Zagreb, Hrvatske vode, 437-446.

Meinzer, O. E., 1923: *Outline of Ground-Water Hydrology*, US Government Printing Office, Washington D.C. pp. 71.

Merriam-Webster, 2024. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/spring> (pristupljeno 27.6.2024.)

Miletić, S., 2014: *GIS izvora voda na području Papuka*. Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet. Diplomski rad. 76 str.

Mladenović, J., Uzunović, O., 1963: Prilog poznavanju hidrogeologije na području sliva vrela Omble. III. JSK, Sarajevo.

Mlinarić, M., Loborec, J., Biondić, R., 2016: Zaštita podzemnih voda – primjer procjene ranjivosti sliva izvora Gradole (Hrvatska) metodom SINTACS. *Inženjerstvo okoliša* 3(1), 21-31.

Mocior, E., Rzonca, B., Siwek, J., Plen-zler, J., Płaczowska E., Dąbek, N., Jaśkowiec, B., Potoniec, P., Roman, S., Ździebko, D, 2015: Determinants of the distribution of springs in the upper part of a flysch ridge in the Bieszczady Mountains in southeastern Poland, *Episodes*, 38 (1), 21-30.

Moghaddam, D.D., Rezaei, M., Pourghasemi, H.R., Pourtaghie Z. S. , Pradhan, B., 2015: Groundwater spring potential mapping using bivariate statistical model and GIS in the Taleghan

Watershed, Iran. *Arab Journal of Geosciences* 8, 913–929. <https://doi.org/10,1007/s12517-013-1161-5>

Montgomery, D., Dietrich, W., 1988: Where do channels begin?. *Nature* 336, 232–234. <https://doi.org/10,1038/336232a0>

Mostowik, K., Górnik, M., Jaśkowiec, B., Maciejczyk, K., Murawska, M., Płaczowska, E., Rzonca, B., Siwek, J., 2016: High discharge springs in the Outer Flysch Carpathians on the example of the High Bieszczady Mountains (Poland). *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences* 11 (2), 395-404.

Mostowik, K., Krzyczman, D., Płaczowska, E., Rzonca, B., Siwek, J., Waławczyk, P., 2021: Spring recharge and groundwater flow patterns in flysch aquifer in the Połonina Wetlińska Massif in the Carpathian Mountains. *Journal of Mountain Science* 18, 819–833. <https://doi.org/10,1007/s11629-020-6524-2>

Msaddek, M. H., Ben Alaya, M., Moumni, Y., Ayari, A., Chenini, I., 2021: Enhanced machine learning model to estimate groundwater spring potential based on digital elevation model parameters. *Geocarto International*, 37(25), 8815–8841. <https://doi.org/10,1080/10106049.2021.2007292>

Natura 2000, Park prirode Medvednica, <https://www.pp-medvednica.hr/zastita-prirode/natura-2000/> (pristupljeno 1.7.2024.)

Negi, G. C., Joshi, V. 2004: Rainfall and Spring Discharge Patterns in Two Small Drainage Catchments in the Western Himalayan Mountains, India. *The Environmentalist* 24, 19-28, <https://doi.org/10,1023/B:ENVR.0000046343.45118.78>.

Netopil, R., 1971: Ke Klasifikaci pramenupodle variability vydatnasti, Sbornik-Hydrological Conference, *Papers. Stud. Geogr.* 22, 145-150.

Niraula, R. R., Sharma, S., Pokharel, B. K., Paudel, U., 2021: Spatial prediction of spring locations in data poor region of Central Himalayas. *Hydrology Research*, 52 (2), 492-505, doi: <https://doi.org/10,2166/nh.2020,223>.

Ojo, O.I., Otieno, F.A.O., Ochieng, G.,M., 2012: Groundwater: Characteristics, qualities, pollutions and treatments: An overview. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering* Vol. 4(6), pp. 162-170.

One-way ANOVA in SPSS Statistics, Laerd Statistics. <https://statistics.laerd.com/spss-tutorials/one-way-anova-using-spss-statistics.php> (pristupljeno 7.7.2024.)

Orešić, D., Čanjevac, I., 2020: Groundwater Resources in Croatia. U: Negm, A., Romanescu, G., Zelenáková, M. (ur.): *Water Resources Management in Balkan Countries*. Heidelberg, Springer International Publishing, 109-132.

Oštrić, M., 2018: Priobalni izvor Blaž – pregled istraživanja u cilju zahvaćanja podzemnih voda (1968. – 2017.), *Hrvatske vode* 26, 103, 49-54.

Ozdemir, A., 2011: GIS-based groundwater spring potential mapping in the Sultan Mountains (Konya, Turkey) using frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods and their comparison. *Journal of Hydrology* 411, 290–308.

Ozyurt, Nur N., Lutz, H.O., Hunjak, T., Mance, D., Roller-Lutz, Z., 2014: Characterization of the Gacka River basin karst aquifer (Croatia): Hydrochemistry, stable isotopes and tritium-based mean residence times, *Science of The Total Environment*, Vol. 487, 245-254, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.04.018>.

Pacheco, F.A.L., Alencão, A.M.P., 2002: Occurrence of springs in massifs of crystalline rocks, northern Portugal. *Hydrogeology Journal* 10, 239–253. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0186-0>

Pahernik, M., 2005: Geomorfologija Gorskog kotara - primjena geografsko informacijskog sustava u istraživanju reljefa. Doktorski rad. Geografski odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu. 387 str.

Pahernik, M., 2007: Digitalna analiza padina otoka Raba, *Geoadria*, 12/1, 3.22.

Pahernik, M., 2012: Prostorna gustoća ponikava na području Republike Hrvatske. *Hrvatski geografski glasnik*, 74. (2.), 5-26. <https://doi.org/10.21861/HGG.2012.74.02.01>

- Pandit, S., Shakya, N., & Shrestha, S. R., 2019: Distribution and classification of springs in Bansbari area of Melamchi Municipality, Sindhupalchowk, Nepal. *Journal of Nepal Geological Society*, 59, 49–58. <https://doi.org/10.3126/jngs.v59i0.24985>
- Parlov, J., Posavec, K., Bačani, A., 2007: The estimation of groundwater recharge from karst spring hydrograph (Bulaž, Croatia), u: Ribeiro, L., Chambel, A., Condesso de Melo, M. (ur.): *XXXV Congress of International Association of Hydrogeologists, Groundwater and Ecosystem*.
- Parsons, A. J., 1988: *Hillslope form*, Routledge, London, UK. 212 p.
- Pavletić, Z. i Matoničkin, I., 1967: Saprobiološka analiza opskrbnih voda potoka Plitvičkih jezera, *Acta Botanica Croatica* 26-27 (1), 17-35.
- Perrault, P., 1674: *De L'origines des fontaines*, Comité National Français des Sciences Hydrologiques, Commission de terminologie, 209.
- Petrik, M., 1958: Prinosi hidrologiji Plitvica, u: Šafar, J. (ur.): *Plitvička jezera, Nacionalni park, Nacionalni park „Plitvička jezera“*, Zagreb, 409-433.
- pH in Drinking-water*. World Health Organisation (WHO), 2007.
- Piper, A., 1944: A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Transactions, American Geophysical Union* 25 (6): 914–928.
- Plączkowska E., Górnik M., Mocior E., Peek, B., Potoniec, P., Rzonca, B., Siwek, J., 2015: Spatial distribution of channel heads in the Polish Flysch Carpathians. *Catena* 127, pp. 240-249.
- Plączkowska, E., Siwek, J., Maciejczyk, K., Mostowik, K., Murawska, M., Rzonca, B. 2018: Groundwater capacity of a flysch-type aquifer feeding springs in the Outer Eastern Carpathians (Poland). *Hydrology Research* 1; 49 (6): 1946–1959. doi: <https://doi.org/10.2166/nh.2018.200>
- Plan upravljanja Parka prirode Medvednica*, 2009. Farkaš-Topolnik, N., (ur.). JU Park prirode Medvednica, Zagreb, 78 str.
- Polšak, A., 1974: Geološki aspekti zaštite Plitvičkih jezera, u: Gušić, B., Marković, M. (ur.): *Plitvička jezera – Čovjek i priroda*, NP Plitvička jezera, 25-32.

- Pourtaghi, Z. S., Pourghasemi, H. R., 2014: GIS-based groundwater spring potential assessment and mapping in the Birjand Township, southern Khorasan Province, Iran. *Hydrogeology Journal*, 22, 643-662.
- Pozojević, I., Brigić, A., S., 2018b: Water mite (Acari: Hydrachnidia) diversity and distribution in undisturbed Dinaric karst springs. *Experimental and Applied Acarology* 76, 123-138, <https://doi.org/10.1007/s10493-018-0294-3>.
- Pozojević, I., Pešić, V., Goldschmidt, T., Gottstein, S., 2020: Crenal Habitats: Sources of Water Mite (Acari: Hydrachnidia) Diversity. *Diversity* 12 (9), 316, 13 doi:10.3390/d12090316.
- Pozojević, I., Pešić, V., i Gottstein, S., 2019: Two water mite species (Acari: Hydrachnidia) from karst springs new for the fauna of Croatia with notes on distribution and environmental preferences, *Natura Croatica* 28(2), 417-424. <https://doi.org/10.20302/NC.2019.28.27>.
- Pozojević, I., Ternjej, I., Mihaljević, Z., Gottstein, S., Vučković, N., Dorić, V., Rumišek, M., 2018a: Prey abundance supporting unusual water mite (Acari: Hydrachnidia) community in a sublacustrine spring and tributary river. *Acta Biologica* 25, 69-75. DOI: 10.18276/ab.2018.25-06.
- Pravilnik o prirodnim mineralnim, prirodnim izvorskim i stolnim vodama*. Ministarstvo poljoprivrede, Zagreb, Narodne novine, 2019. https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/full/2019_09_85_1743.html (17.7.2024.)
- Pravilnik o zdravstvenoj ispravnosti vode za piće*, Ministarstvo zdravstva i socijalne skrbi, Zagreb, Narodne novine, 2008. https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2008_04_47_1593.html (7.5.2024.)
- Prostorni plan Parka prirode Medvednica, Knjiga 1. Odredbe za provođenje*, Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja; Hrvatski zavod za prostorni razvoj; Zavod za prostorno uređenje Grada Zagreba, Zagreb, 2014, 74 str.
- Radišić, M., Horvat, B., Oštrić, M., Rubinić, J., 2020: Vodni režim pronosa nanosa u slivu pazinčice i podzemnom krškom vodonosniku izvora Rakonek, u: Oskoruš, D., Rubinić, J. (ur.): *Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi*, 293-296.
- Radoš, D., Lozić, S., Šiljeg, A., 2012.: Morfometrijske značajke šireg područja Duvanjskog polja, Bosna i Hercegovina, *Geoadria* 17(2), 177-207.

- Riđanović, J., 1974: Hidrogeografske značajke Južne Hrvatske, *Hrvatski geografski glasnik* 36-37 (1), 75-85.
- Riđanović, J., 1976: Hidrogeografske značajke Nacionalnog parka Plitvičkih jezera, *Hrvatski geografski glasnik* 38 (1), 246-252.
- Risko, J., 2018: Sacred Springs: Perceptions of Religion and Water in Village Communities of Uttarakhand, *Independent Study Project (ISP) Collection*, 2852.
- Roglić, J., 2005: *Geomorfološke teme*. Sabrana djela Josipa Roglića, Knjiga II (ur. Mate Maras). Geografsko društvo, Split; Hrvatsko geografsko društvo, Zadar; Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu; Sveučilište u Zadru; Meridijani, Samobor. 558 str.
- Rzonca, B., Kołodziej, A., Laszczak, E., Mocior, E., Plenzler, J., Płaczkowska, E., Rozmus, M., Siwek, J., S' cisłowicz, B., Wójcik, S., Ziółkowski, L., 2008: Zródła w zlewni górnej Wołosatki w Bieszczadach Wysokich (Springs in the upper Wołosatka river catchment in the High Bieszczady Mountains). *Przegląd Geologiczny* 56 (8/2), pp. 772–779.
- Rubinić, J., Cindrić Kalin, K., Nežić, M., Radišić, M., Ružić, I., 2015: Ekstremena suša na izvorištima vodoopskrbe u slivu Mirne tijekom 2012. godine, u: Biondić, D., Holjević, D. (ur.): *6. hrvatska konferencija o vodama s međunarodnim sudjelovanjem: hrvatske vode na investicijskom valu*. Zbornik radova, Opatija, 20. –23. svibnja 2015., 171-180.
- Sada, D.W., Lutz, A.D., 2016: *Environmental Characteristics of Great Basin and Mojave Desert Spring Systems*. Desert Research Institute. 50 str.
- Schenk, E. R.; Jenness, J. urStevens, L. E., 2018: *Springs Distribution, Flow, and Associated Species in the Verde River Basin, Arizona*. Springs Stewardship Institute Technical Report to One for the Verde. Museum of Northern Arizona, Flagstaff, AZ. 47. DOI: 10.13140/RG.2.2.27113.95846.
- Schoewe, W., 1953: The geography of Kansas, Part III, Hydrogeography. *Transactions of the Kansas Academy of Science* 56(2): 131-147, 187-190.
- Szczucińska, A. 2016: Spring water chemistry in a formerly glaciated area of western Poland: the contribution of natural and anthropogenic factors. *Environmental Earth Sciences* 75, 712. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5548-y>

Shuster, E. T., White, W. B., 1971: Seasonal fluctuations in the chemistry of lime-stone springs: A possible means for characterizing carbonate aquifers, *Journal of Hydrology* 14 (2), 93-128, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(71\)90001-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(71)90001-1).

Siwek, J., Chełmicki, W., 2004: Geology and land-use related pattern of spring water quality. Case study from the catchments of the Malopolska Upland (S. Poland), *Geologica Acta* 2 (2), 167-174.

Solger, F., 1931: Der Boden Niederdeutschlands nach seiner letzten Vereisung, *Deutsche Urzeit*, Band II (8). Verlag von Dietrich Reimer, Ernst Vohsen, Berlin.

Sørensen, R., Zinko, U., Seibert, J., 2006: On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10 (1), pp. 101–112. doi:10.5194/hess-10-101-2006.

Spitale, D., Leira, M., Angeli, N., Cantonati, M., 2012: Environmental classification of springs of the Italian Alps and its consistency across multiple taxonomic groups, *Freshwater Science* 31 (2), 563-574.

Springer, A. E., Stevens, L. E., Anderson, D. E., Parnell, R. A., Kreamer, D. K., Levin, L., Flora, S. P.: 2008: A Comprehensive Springs Classification System: Integrating Geomorphic, Hydrogeochemical, And Ecological Criteria, u: Stevens, L. E., Meretsky V. J., Gary Paul Nabhan, G. P. (ur.): *Aridland Springs in North America: Ecology and Conservation*, The University of Arizona Press, Tucson.

Springer, A. E., Stevens, L. E., 2009: Spheres of discharge of springs, *Hydrogeology journal* 17 (1), 83-93, DOI 10.1007/s10040-008-0341-y.

Springer A.E., Stevens L.E., Ledbetter J.D., Schaller E.M., Gill K., Rood S.B., 2015: Ecohydrology and stewardship of Alberta springs ecosystems. *Ecohydrology*, 8:896-910. <https://doi.org/10.1002/eco.1596>.

Sukhija B.S., Reddy, D.V., Nagabhushanam, P., Hussain, S., 2003: Recharge processes: piston flow vs preferential flow in semi–arid aquifers of India. *Hydrogeology Journal* 11: 387-395.

Steinmann, P., 1915: Praktikum der Süßwasserbiologie. Teil 1: Die Organismen des fließenden Wassers. Borntraeger, Berlin, 184.

- Stevens, L.E., Jenness J., Ledbetter, J.D., 2020: Springs and Springs-Dependent Taxa of the Colorado River Basin, Southwestern North America: Geography, Ecology and Human Impact. *Water* 12 (5): 1501. <https://doi.org/10.3390/w12051501>
- Stevens, L. E., Schenk, E. R., Springer, A. E., 2021: Springs ecosystem classification. *Ecological Applications* 31 (1):e002218. 10.1002/eap.2218.
- Stiny, J., 1933: *Springs, the geological foundations of springs for engineers of all disciplines as well as students of natural science*, Vienna: Julius Springer Publisher.
- Slišković, I., Šarin, A., 1999a: Osnovna hidrogeološka karta Hrvatske 1:100 000, list Ivanić Grad. Institut za geološka istraživanja Zagreb, Zavod za hidrogeologiju i inženjersku geologiju.
- Slišković, I., Šarin, A., 1999b: *Osnovna hidrogeološka karta Hrvatske 1:100 000, list Ivanić Grad - Tumač*. Institut za geološka istraživanja Zagreb, Zavod za hidrogeologiju i inženjersku geologiju.
- Šikić, K., 1995: Geološki vodič Medvednice. Institut za geološka istraživanja, Zagreb.
- Šikić, K., Basch, O., Šimunić, A. 1977: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100,000, List Zagreb L33–80. Institut za geološka istraživanja, Zagreb, Redakcija i izdanje Saveznog geološkog zavoda Beograd.
- Šikić, K., Basch, O., Šimunić, A., 1979: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100,000, Tumač za list Zagreb L33–80. Institut za geološka istraživanja, Zagreb, Savezni geološki zavod, Beograd.
- Šimunjak, Z.Z., 2006: Utjecaji zimskog održavanja na mostove i cestovne građevine. *Hrvatski cestar*, Gospodarsko interesno udruženje trgovačkih društava za održavanje cesta, Zagreb, 93-98.
- Tambe, S., Kharel, G., Arrawatia, M. L., Kulkarni, H., Mahamuni, K., Ganeriwala, A. K., 2012: Reviving Dying Springs: Climate Change Adaptation Experiments From the Sikkim Himalaya, *Mountain Research and Development* 32(1), 62-72.
- Thienemann A., 1924: Hydrobiologische Untersuchungen an Quellen, *Archiv für Hydrobiologie* 14, 151-190.
- Tien Bui, D.; Shirzadi, A.; Chapi, K.; Shahabi, H.; Pradhan, B.; Pham, B.T.; Singh, V.P.; Chen, W.; Khosravi, K.; Bin Ahmad, B., Lee, S., 2019: A Hybrid Computational Intelligence Approach to Groundwater Spring Potential Mapping. *Water*, 11, 2013. <https://doi.org/10.3390/w11102013>

- Tolman, C.F., 1937: *Ground Water*. New York: McGraw Hill, SAD.
- Toth, J., 1971: Groundwater discharge: A common generator of diverse geologic and morphologic phenomena. *International Bulletin of Scientific Hydrology* 16(1): 7-24.
- Tomašić, I., 1962: Ispitivanje izvora Gradole u dolini Mirne, Tehnički izvještaj, OVP Rijeka.
- Turc, L., 1951: Nouvelle formule pour le calcul du bilan de l' eau en fonction des valeurs moyennes annuelles des precipitations et de la temperature. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, Vol. 233. 633-635.
- Van Everdingen, R.O., 1991: Physical, chemical, and distributional aspects of Canadian springs. *Memoirs of the Entomological Society of Canada* 123: 7-28.
- van Tubergen, A., van der Linden, S., 2002: A brief history of spa therapy. *Annals of the Rheumatic Diseases* 61, 273-275, DOI: 10.1136/ard.61.3.273.
- Vashisht, A. K., Sharma, H. C., 2007: Study on hydrological behaviour of a natural spring. *Current Science* 93 (6), 837-840.
- Vashisht, A. K., Bam, B., 2013: Formulating the spring discharge-function for the recession period by analyzing its recession curve: A case study of the Ranichauri spring (India), *Journal of Earth System Science* 122, 1313-1323, <https://doi.org/10.1007/s12040-013-0356-1>.
- Veronese, G., 1939: Appunti per la storia del grande acquedotto Istriano, Padova, 85.
- von Fumetti, S.; Nagel, P.; Baltes, B., 2007: Where a springhead becomes a springbrook a regional zonation of springs, *Fundamental and Applied Limnology* 169 (1), 37 – 48. Doi: 10.1127/1863-9135/2007/0169-0037.
- Vujnović, T., 2011: Springs in the Žumberak – Samoborsko Gorje Nature Park. *Natura Croatica*, 20 (1), 19-34.
- Vurnek, M., Brozinčević, A., Briški, F., Matočkin Kepčija, R., 2016: Distributional patterns of fecal indicator bacteria in spring area of Plitvice Lakes National park, *Periodicum Biologorum* 118 (1), 37-44.
- Water quality standards*, Mary River Catchment Coordinating Comitee, Gympie, Australija, 2013.

- Water quality standards*, National Environment Commission, Bhutan, 2018.
- Webb, D.W., Wetzel, M.J., Phillippe, L.R. 1998: *The Aquatic Biota and Groundwater Quality of Springs in the Lincoln Hills, Wisconsin Driftless, and Northern Till Plains Sections of Illinois*. Illinois Natural History Survey Center for Biodiversity. SAD.
- Welch, B., 1951: On the Comparison of Several Mean Values: An Alternative Approach. *Biometrika*, 38, 330-336. [http://dx.doi.org/10,1093/biomet/38.3-4.330](http://dx.doi.org/10.1093/biomet/38.3-4.330)
- Zagorščak, D., 1988: Gips iz dva nalazišta u Medvednici (SR Hrvatska). *Geološki vjesnik* 41, Zagreb. 75-80.
- Zg geoportal. Digitalni model reljefa 2012. <https://geoportal.zagreb.hr/Karta> (Pristupljeno 28.6.2024)
- Zollhofer, J.; Brunke, M.; Gonser, T. A, 2000: spring typology integrating habitat variables and fauna. *Archive Fur Hydrobiologie - Supplements* 121, 3-4.
- Žugaj, R., 2000: *Hidrologija*. Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Žugaj, R., 2010: *Velike vode malih sivova* (ur. Zorić, I.). Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Hrvatska komora arhitekata i inženjera u graditeljstvu, Zagreb. 77.

EXTENDED SUMMARY

Through extensive field work, 900 springs have been mapped on the southern slopes of the Medvednica mountain. In several sources it was stated that the number of springs in the whole area of Nature park Medvednica is around 230, which makes their real number several times higher than previously thought. *In situ* measurements were done on every spring available, measuring their discharge using the volumetric method, as well as electric conductivity, temperature and pH using portable multimeter.

The distribution of springs was analysed with respect to the geological and morphometrical characteristics of the area using the GIS software. Based on the field discharge measurements, the discharge classes were determined. All of the collected data was organised in an MS Excel table and in a GIS shapefile containing all the available data for every spring.

The discharge of the springs measured is generally less than 1 l/s, with most springs discharging between 0,01 and 0,1 l/s. It was found that most of the springs of highest discharge were on altitudes below 600 meters, which was the opposite of previously thought. Most of the high discharge springs are also altered for human consumption, be it as a part of the local water supply system or only as a refreshment for hikers.

With the respect to the geological characteristics of the area, it was found that the number of springs decreases with distance from known faults and contact zones, even though the density did not show simple connection to the distances. This could be explained by the relatively rough geological data but also by the fact that other parameters other than (hydro)geological influence the spring emergence. Differences in the number and density of springs were also determined with respect to the lithostratigraphic units of the study area. The largest number of springs is occurring in the area of parametamorphic rocks of Devonian and Carboniferous age, while the highest density was found in the area of Paleogene conglomerates and sandstones. Some lithostratigraphic units with very small areas contained no springs. The lowest density of springs in lithostratigraphic units of relatively larger area was found in karstic areas of south west, in areas of Upper Triassic (T₃) dolostones.

In terms of morphometric characteristics, the springs occur most frequently on concave and convergent slopes and on slopes with an inclination from 12° to 32°, or more precisely from 20° to 25°. Highest number of springs can be found on elevation between 400 and 500 meters above sea level, while their highest density is measured in areas with elevation between 700 and 800 meters a.s.l. Considering the relative relief of the area, highest number and density of springs are found in

the areas around average relative relief values, around 250 m/km². Except those areas, more springs are found in areas of relative relief higher than average than lower than average. Areas with TWI indeks between 5 and 6 have the most springs, even though their highest density is found in areas with TWI values between 9 and 10.

Using expanded Steinmann's and Thieneman's classification, the spring type was determined for most of the springs. Helocrene springs are the most common, followed by rheocrene and transitional types. The spring types with respect to their position within the drainage network were introduced by determining initial springs, springs within the channel and lateral springs. Most of the sorings were of the initial type.

Physico-chemical parameters have shown great varieties among the springs. Temperatures varied from 3 °C to 18 °C, which was cause mostly by environmental conditions during measurements as well as the hydrogeological and hydrological characteristics of the springs. Most of the springs had temepratured that were around average air temperatures of the study area, more precisely between 7 °C and 12 °C. The electrical conductivity values were lower than 800 µS/cm in 96 % of the measured springs. Absolute values from all measurements varied from 41 µS/cm to 2062 µS/cm. Such different values are the result of natural factors, but also anthropogenic influence. Same can be said for pH values which varied between 5.32 and 8.67. In 93 % of cases pH of spring water was between 6.5 and 8.5, which is within the drinking water standards.

By monitoring several springs, their hydrological and physico-chemical characteristics were determined. Monitored springs have shown different responses to precipitation and different discharge amplitudes. Laboratory ion analysis results have shown the effects of the treatment of roads with de-icing agents on water quality. High Na⁺ and Cl⁻ concentrations pointed out the road treatment as the main reason of very high electrical conductivity values.

This research brought some fundamental knowledge on spatial and hydrological characteristics of the springs, which can be used in further research that is very much needed.

ŽIVOTOPIS AUTORA

Ivan Martinić rođen je u Zagrebu 1992. godine, gdje je završio osnovnu i srednju školu. Preddiplomski istraživački studij geografije na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu upisao je 2012. godine, a završio 2015. godine. Diplomski studij Geografije, smjer Fizička geografija s geoekologijom završio je u siječnju 2018. Iste godine zapošljava se na Geografskom odsjeku, prvo kao surandik na projektu, a potom kao asistent. Od nastave na prijediplomskom studiju održava vježbe iz kolegija Hidrologija, dok na diplomskom studiju drži vježbe iz kolegija Primijenjena hidrogeografija te seminar iz kolegija Prirodni rizici.

Tijekom dosadašnjeg rada na Odsjeku zajedno s koautorima objavio je 10 znanstvenih i 5 stručnih radova, od čega 1 znanstveni rad i 2 stručna rada samostalno. Sudjelovao je na više projekata hidromorfološkog monitoringa tekućica i stajaćica u Hrvatskoj te na projektima istraživanja hidromorfoloških i geomorfoloških obilježja tekućica na području Nacionalnog parka Plitvička jezera. Vodio je stručne projekte vezane za problematiku hidroloških i geomorfoloških obilježja ribnjaka Crna Mlaka.

Dobitnik je triju nagrada Brdo koje Studentski zbor PMF-a dodjeljuje najboljim nastavnicima i asistentima svake akademske godine.