

Hidrogeokemijske značajke voda u širem području izvora Tounjčice

Brozović, Dorotea

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:598724>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-24**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij geološkog inženjerstva

**HIDROGEOKEMIJSKE ZNAČAJKE VODA U ŠIREM PODRUČJU IZVORA
TOUNJČICE**

Diplomski rad

Dorotea Brozović

G2234

Zagreb, 2024.

KLASA: 602-01/24-01/148
URBROJ: 251-70-13-24-1
U Zagrebu, 20.09.2024.

Dorotea Brozović, studentica

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/24-01/148, URBROJ: 251-70-13-24-1 od 19.07.2024. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

HIDROGEOKEMIJSKE ZNAČAJKE VODA U ŠIREM PODRUČJU IZVORA TOUNJČICE

Za mentoricu ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Prof.dr.sc. Jelena Parlov nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentorica:


(potpis)

Prof.dr.sc. Jelena Parlov

(titula, ime i prezime)

Predsjednica povjerenstva za
završne i diplomske ispite:


(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Ana Maričić

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:


(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)

Veliko hvala mojoj mentorici prof.dr.sc. Jeleni Parlov na savjetima, uloženom trudu i velikom strpljenju.

Zahvaljujem se svim prijateljima koji su bili uz mene tijekom studiranja.

A posebno se zahvaljujem obitelji i Karlu koji su bili moja najveća podrška i bez kojih ovaj rad ne bi bio napisan.

HIDROGEOKEMIJSKE ZNAČAJKE VODA U ŠIREM PODRUČJU IZVORA TOUNJČICE
Dorothea Brozović

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

U okviru rada provedena je analiza hidrogeokemijskih značajki voda u širem području izvora Tounjčice. Uzorkovanje izvorskih i površinskih voda provedeno je na 16 lokacija u srpnju 2024. godine. Za kemijsku analizu vode korištene su metode ionske kromatografije i titracije, koje su omogućile precizno određivanje koncentracija glavnih iona, uključujući kalcij (Ca^{2+}) i magnezij (Mg^{2+}). Omjer magnezijevih i kalcijevih iona važan je indikator hidrogeokemijskih procesa u krškim sustavima te daje uvid u podrijetlo i kretanje podzemnih voda, kao i u geokemijske procese poput otapanja karbonatnih stijena. Također, provedene su detaljne hidrološke analize izdašnosti izvora i protoka površinskih voda, što pomaže boljem razumijevanju dinamike voda u ovom krškom području.

Ključne riječi: Izvor Tounjčice, hidrogeokemijski facijes, Piperov dijagram, hidrološke analize

Završni rad sadrži: 57 stranica, 3 tablice, 61 slika i 29 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Prof.dr.sc. Jelena Parlov

Ocjenjivači: Prof.dr.sc. Jelena Parlov
Izv.prof.dr.sc. Zoran Kovač
Izv.prof.dr.sc. Dario Perković

HYDROGEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF WATERS IN THE WIDER AREA OF THE
TOUNJČICA SPRING
Dorothea Brozović

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Geology and Geological Engineering
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

As part of the study, an analysis of the hydrogeochemical characteristics of waters in the wider Tounjčica spring area was conducted. Sampling of spring and surface waters was carried out at 16 locations in July 2024. For the chemical analysis of the water, ion chromatography and titration methods were used, which enabled precise determination of the concentrations of major ions, including calcium (Ca^{2+}) and magnesium (Mg^{2+}). The ratio of magnesium to calcium ions is an important indicator of hydrogeochemical processes in karst systems and provides insight into the origin and movement of groundwater, as well as geochemical processes such as the dissolution of carbonate rocks. In addition, detailed hydrological analyses of spring discharge and surface water flow were conducted, which contribute to a better understanding of water dynamics in this karst area.

Keywords: Tounjčica spring, hydrogeochemical facies, Piper diagram, hydrological analyses

Thesis contains: 57 pages, 3 tables, 61 figures and 26 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisors: Prof.dr.sc. Jelena Parlov

Reviewers: Prof.dr.sc. Jelena Parlov
Izv.prof.dr.sc. Zoran Kovač
Izv.prof.dr.sc. Dario Perković

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. GEOGRAFSKE I GEOMORFOLOŠKE ZNAČAJKE PODRUČJA ISTRAŽIVANJA	2
3. HIDROMETEOROLOŠKE ZNAČAJKE.....	6
4. GEOLOŠKE I HIDROGEOLOŠKE ZNAČAJKE.....	10
4.1. Hidrološka analiza	12
4.2. Recesijska analiza	18
5. HIDROGEOKEMIJSKA ISTRAŽIVANJA	29
5.1. Terenski rad i uzorkovanje.....	29
5.2. Laboratorijsko istraživanje	43
5.2.1. Metoda ionske kromatografije	43
5.2.2. Metoda titracije	45
5.3. Hidrogeokemijske značajke	47
6. RASPRAVA	51
7. ZAKLJUČAK.....	53
8. LITERATURA	55

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Područje istraživanja (podloga: topografska karta 2011. – Geoportal DGU)	3
Slika 2.2. Prikaz fluviokrške morfologije istraživanog područja (I – zona površinskog otjecanja, II – aktivna ponorska zona, III – reliktna ponorska zona, IV – zona suhих dolina, V – izvorišna zona, VI – zona površinskog otjecanja; 1 – površinski vodeni tokovi, aktivni i povremeni, 2 – aktivni ponori, aktivni izvori, 3 – aktivne plitke fluviokrške doline, 4 – aktivne kanjonske fluviokrške doline, 5 – suhe fluviokrške doline, 6 – izvorišni obluci, 7 – aktivne ponorske doline, 8 – reliktnе ponorske doline, 9 – viseća doline, 10 – veća krška depresija, 11 – utvrđene podzemne veze, 12 – utvrđeni podzemni tokovi u špiljama, 13 – pretpostavljene podzemne veze, 14 – špiljski kanali (T – Tounjčica, ŠKT – Špilja u kamenolomu Tounj, M – jama Mandelaja), 15 – nadmorske visine aktivnih i reliktnih ponorskih dolina, 16 – nadmorske visine suhих dolina, 17 – nadmorska visina dna krške depresije, 18 – nadmorske visine špiljskih kanala, 19 – nadmorske visine izvora) (Bočić, 2020).....	5
Slika 3.1. Prikaz srednjih mjesečnih vrijednosti temperature zraka i količine oborina za razdoblje od 1949. do 2022. godine	7
Slika 3.2. Prikaz prosječnih mjesečnih temperatura zraka i mjesečnih količina oborina za svaku pojedinačnu godinu od 2014. do 2022. godine	9
Slika 4.1. Hidrogeološka karta područja istraživanja (prema Boljat i dr., 2024b)	11
Slika 4.2. Srednje dnevne izdašnosti izvora Zagorske Mrežnice	12
Slika 4.3. Srednje dnevne izdašnosti izvora Pećina.....	13
Slika 4.4. Srednje dnevne izdašnosti izvora Bistrec.....	13
Slika 4.5. Srednji dnevni protoci na postaji Turkovići, Ogulinska Dobra	14
Slika 4.6. Srednji dnevni protoci na postaji Juzbašići, Mrežnica	15
Slika 4.7. Srednji dnevni protoci na postaji Mrzlo Polje, Mrežnica.....	15
Slika 4.8. Izračunati srednji dnevni protoci rijeke Tounjčice.....	16
Slika 4.9. Krivulja trajanja protoka rijeke Tounjčice	18
Slika 4.10. Glavna recesijska krivulja za izvor Zagorske Mrežnice	19
Slika 4.11. Krivulja trajanja izvora Zagorske Mrežnice.....	19
Slika 4.12. Dvodijelna glavna recesijska krivulja izvora Zagorske Mrežnice	20
Slika 4.13. Trodijelna glavna recesijska krivulja za izvor Zagorske Mrežnice.....	20
Slika 4.14. Glavna recesijska krivulja izvora Pećina.....	21
Slika 4.15. Glavna recesijska krivulja izvora Bistrec	21

Slika 4.16. Krivulja trajanja izvora Bistrec	22
Slika 4.17. Trodijelna glavna recesijska krivulja za izvor Bistrec	22
Slika 4.18. Glavna recesijska krivulja za postaju Turkovići	23
Slika 4.19. Krivulja trajanja za postaju Turkovići.....	23
Slika 4.20. Dvodijelna glavna recesijska krivulja za postaju Turkovići	24
Slika 4.21. Glavna recesijska krivulja za postaju Juzbašići	24
Slika 4.22. Krivulja trajanja za postaju Juzbašići.....	25
Slika 4.23. Trodijelna glavna recesijska krivulja za postaju Juzbašići.....	25
Slika 4.24. Glavna recesijska krivulja za postaju Mrzlo Polje	26
Slika 4.25. Krivulja trajanja za postaju Mrzlo Polje.....	26
Slika 4.26. Dvodijelna glavna recesijska krivulja za postaju Mrzlo Polje	27
Slika 4.27. Glavna recesijska krivulja za Tounjčicu	27
Slika 4.28. Krivulja trajanja za Tounjčicu.....	28
Slika 4.29. Dvodijelna glavna recesijska krivulja za Tounjčicu	28
Slika 5.1. Lokacije uzorkovanja (podloga: topografska karta 2011. – Geoportal DGU)	29
Slika 5.2. Mjesto uzorkovanja i ponor rijeke Dobre (Đulin ponor)	30
Slika 5.3. Izvor Zagorske Mrežnice	31
Slika 5.4. Zagorska Mrežnica nizvodno od izvora	31
Slika 5.5. Izvor Pećina.....	32
Slika 5.6. Izvor Bistrec	32
Slika 5.7. Ponor Zagorske Mrežnice	33
Slika 5.8. Izvor Bocino vrelo.....	34
Slika 5.9. Ponor Bocinog potoka.....	35
Slika 5.10. Ponor Munjave	35
Slika 5.11. Izvor Bistrac	36
Slika 5.12. Izvor Globornice	37
Slika 5.13. Nizvodni dio Globornice.....	37
Slika 5.14. Izvor rijeke Tounjčice	38
Slika 5.15. Izvor Kukače	39
Slika 5.16. Tok Kukače	39
Slika 5.17. Izvor Rudnice	40
Slika 5.18. Mjesto uzorkovanja na Tounjčici prije ulijevanja u Mrežnicu.....	41
Slika 5.19. Mjesto uzorkovanja na Mrežnici prije ulijevanja Tounjčice.....	42
Slika 5.20. Slapovi na mjestu ulijevanja Tounjčice u Mrežnicu	42

Slika 5.21. Prikaz filtra i procesa filtriranja.....	43
Slika 5.22. Ionski kromatograf	44
Slika 5.23. Primjer kromatograma.....	45
Slika 5.24. Aparatura za titraciju	46
Slika 5.25. Promjena boje nakon titracije.....	47
Slika 5.26. Piperov dijagram	48
Slika 5.27. Mg^{2+}/Ca^{2+} omjer u svim uzorcima vode.....	50
Slika 5.28. Mg^{2+}/Ca^{2+} omjer za izvorske vode	50

POPIS TABLICA

Tablica 4.1. Usporedba izračunatih i izmjerenih protoka Tounjčice.....	17
Tablica 4.2. Negativne vrijednosti protoka Tounjčice	17
Tablica 5.1. Koncentracije aniona i kationa te ionski balans	47

1. UVOD

Izvor Tounjčice smješten je u krškom području središnje Hrvatske, gdje voda prolazi kroz vapnence i dolomite karakteristične za Dinarski krš. Ovaj izvor ima važnu ulogu u lokalnoj hidrologiji, tvoreći najveću pritoku rijeke Mrežnice. Pritoci poput Tounjčice ključni su za održavanje stalnog protoka vode u Mrežnici, osobito tijekom sušnih razdoblja kada mali izvori postaju glavni izvor vode. Specifični geološki i hidrogeološki uvjeti u vodonosniku izvora Tounjčice značajno utječu na kemijski sastav i njezine vode i vode rijeke Mrežnice. Hidrogeokemijska analiza omogućuje uvid u procese koji oblikuju kvalitetu podzemnih i površinskih voda, uključujući interakciju vode i stijena, biološke aktivnosti te utjecaj ljudskih djelovanja.

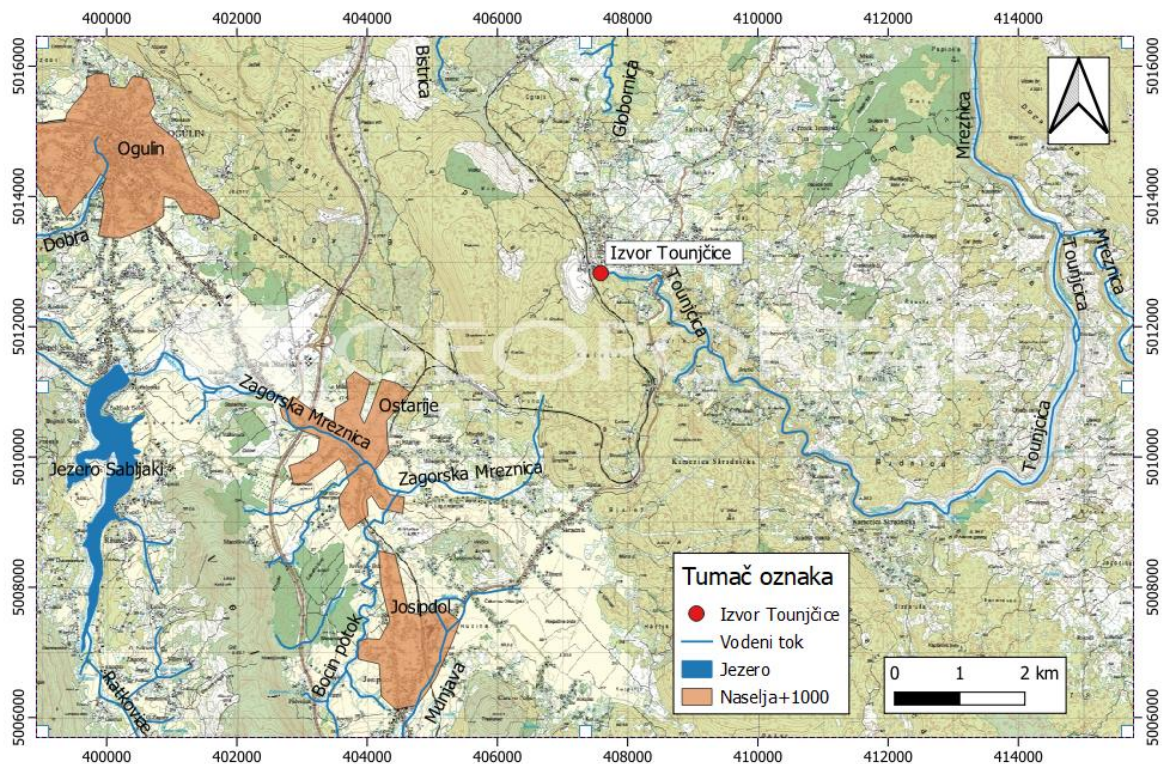
Izgradnja brane na Zagorskoj Mrežnici i stvaranje umjetnog jezera Sabljaci prekinuli su prirodni tok rijeke. Prije izgradnje brane, Zagorska Mrežnica je ponirala i napajala izvor Tounjčice. Preusmjeravanje vode prema hidroelektrani Gojak dovelo je do smanjenja izdašnosti izvora Tounjčice. Kroz hidrogeokemijske analize, istražen je sastav voda u priljevnom (i širem) području izvora Tounjčice kako bi se utvrdila današnja povezanost ponirućih voda sa samim izvorom. Ovaj izvor je zanimljiv predmet istraživanja jer je pod izravnim utjecajem ljudske intervencije u okoliš uz istovremeni izostanak kontinuiranih mjerenja kakvoće i izdašnosti.

Cilj ovog diplomskog rada je, osim utvrđivanja hidrogeokemijskog facijesa voda na širem području izvora Tounjčice, analizirati hidrološke i hidrogeološke odnose tog područja. Hidrogeokemijski facijes određen je uz pomoć Piperovih dijagrama temeljenih na kemijskim analizama uzoraka vode prikupljenih u srpnju 2024. godine tijekom sušnog razdoblja. Pored toga proučen je omjer Mg^{2+}/Ca^{2+} iona koji dodatno ukazuju na vrste karbonatnih stijena s kojima je voda bila u kontaktu. Također, usporedbom podataka o temperaturi zraka i količini oborina od 1949. do 2022. godine te od 2014. do 2022. godine dan je uvid u klimatske i vremenske obrasce, jer praćenje dugoročnih promjena u temperaturi i oborinama pomaže u otkrivanju znakova klimatskih promjena.

2. GEOGRAFSKE I GEOMORFOLOŠKE ZNAČAJKE PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

Istraživano područje obuhvaća šire područje izvora Tounjčice s površinom od 164 km². Zahvaća općine Ogulin, Josipdol, Tounj te u manjoj mjeri Barilović (slika 2.1.). To je krško područje koje karakterizira složena mreža podzemnih tokova i speleoloških objekata. Iako je za krško područje tipično izostajanje površinskih tokova, na istraživanom području prisutni su površinski tokovi. Rijeka Tounjčica započinje s izvorom Tounjčice u Tounju i duga je 14,6 km te se ulijeva u rijeku Mrežnicu u mjestu Mrežnica. Glavne pritoke rijeke Tounjčice čine vode koje izviru na izvorima Kukača i Rudnica. Kukača izvire u istoimenom selu Kukača, nedaleko od Tounja, a Rudnica u mjestu Tržić Tounjski. Rijeka Zagorska Mrežnica izvire u selu Desmerice, a zbog izgradnje brane u Sabljak selu i formirane retencije Sabljaci većina vode se preusmjerava na HE Gojak koja se nalazi pored izvora Gojak gdje započinje tok Donje Dobre. Vode Zagorske Mrežnice su prije navedenog preusmjeravanja prirodno ponirale u mjestu Oštarije, dok danas do poniranja dolazi samo u vrijeme velikih voda tj. kada se ispušta višak iz retencije Sabljaci. Manje površinske vodotoke na istraživanom području predstavljaju rijeka Munjava koja ponire u Josipdolu te potok koji se formira nizvodno od Bocinog vrela. Bocino vrelo nalazi se u mjestu Podveljun koje je smješteno ispod brda Podveljun u općini Josipdol te za vrijeme visokih voda predstavlja jedan o pritoka rijeke Zagorske Mrežnice. Izvor Bistrac koji formira potok Bistrice, te izvor Globornice smješteni su na području Gerova Tounjskog, međusobno udaljeni 2,5 km i pripadaju slivu rijeke Dobre.

Prema CORINE Lande Cover (2012) većinu područja istraživanja čine tereni pokriveni šumom. Dakle, najveća pokrivenost odgovara šumskom području s 61,2%, zatim poljoprivrednom 31,1%, urbano područje zauzima 6% te vodenom području pripada 1,7% istraživanog područja. Iako je područje slabo naseljeno, evidentirana su povremena onečišćenja voda. Grad Ogulin predstavlja veliki izvor onečišćenja zbog industrijskih pogona koji se nalaze na tom području, ali i problema s propusnom kanalizacijom. Nadalje, na istraživanom području veliki problem za kakvoću voda predstavljaju divlja odlagališta otpada koja se nalaze u šumama koje prekrivaju većinu područja.



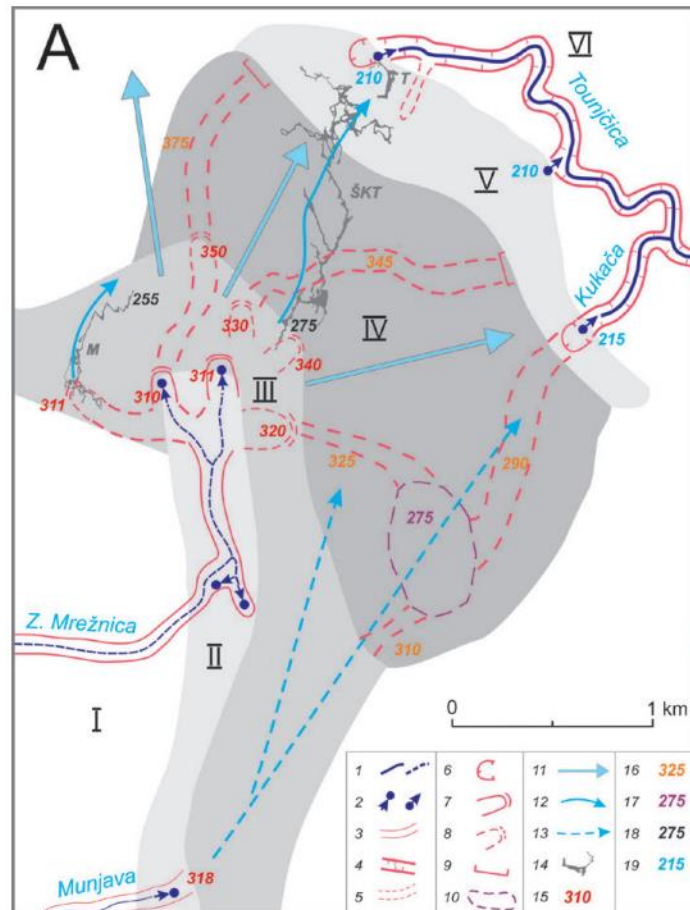
Slika 2.1. Područje istraživanja (podloga: topografska karta 2011. – Geoportal DGU)

Istraživano područje nalazi se na dodiru dviju mezogeomorfoloških regija: Ogulinsko-plašćanske zavale i Unsko-koranske zaravni. Ogulinsko-plašćanska zavalica je krška depresija kojom teku rijeke ponornice – Ogulinska Dobra, Zagorska Mrežnica, Munjava i Dretulja (Bahun, 1970). Unsko-koranska krška zaravan odlikuje se pojavom brojnih, duboko usječenih, dolina i kanjona te velikom gustoćom ponikvi (Bočić i dr., 2010; 2015; Pahernik, 2012). Navedene dvije cjeline međusobno su orografski odvojene Krpelskim pragom (Bočić, 2020).

Najbrojniji i najprepoznatljiviji krški reljefni oblici koji se nalaze na istraživanom području su ponikve. Uz ponikve se na istraživanom području nalaze i dvije krške depresije koje se mogu svrstati u kategoriju uvala – uvala Košare i uvala Kamenica (Bočić, 2020). Fluviokrški reljef odlikuje se kombinacijom djelovanja krških i fluvijalnih procesa, tj. značajnom pojavom riječnih dolina na okršenom terenu (Gunn, 2006), pa je razvoj takvog reljefa u tijesnoj vezi s hidrogeološkim obilježjima istraživanog područja (Bočić, 2020). Na istraživanom području zabilježeni su brojni fluviokrški oblici, ali njihov prostorni raspored nije ujednačen (Bočić, 2020).

Šire područje Ogulinsko-plašćanske zavale Bočić (2020) dijeli na šest zona (slika 2.2). U jugozapadnom dijelu, tj. na uzvodnoj (predponorskoj) strani sustava nalaze se doline

Zagorske Mrežnice i Munjave koje čine I. zonu. Na kontaktu sa središnjim (višim) dijelom područja stvaraju se uvjeti za razvoj kontaktnog krša (Gams, 1986; 2001). Dolazi do poniranja površinskih tekućica i oblikovanja ponorskih dolina. Na tom području se nalaze slijepe ponorske doline Zagorske Mrežnice te ponorska dolina proširenog dna Munjave (Bočić, 2020). Slijepe doline nastaju bočnom korozijom u inundacijskom nivou zbog smanjenog propusnog kapaciteta ponora, a doline proširenog dna nastaju na prijelazu iz fluviokrške doline u otvorenu kršku zaravan (Mihevc, 1991). Ponori Zagorske Mrežnice i Munjave čine II., tj. aktivnu ponorsku zonu u fluviokrškom sustavu. Na nju se nastavlja III. zona, tj. zona reliktnih ponorskih dolina. Utvrđene su najmanje četiri reliktnne ponorske zone različitog stupnja razvoja (Bočić, 2020). One reliktnne ponorske doline koje se nalaze na većim visinama znatnije su destruirane denudacijskim procesima te su i teže prepoznatljive u reljefu. U višem, središnjem dijelu nema aktivnih površinskih tokova te su tu zabilježene četiri suhe, tj. okršene doline zbog čega se ta zona naziva zona suhih dolina – IV. zona. Na kontaktu središnjeg višeg dijela i niže zaravni nalazi se zona izvora. Karakterizirana je pojavom aktivnih izvorišnih oblika Tounjčice i Kukače koji se nalaze na samoj rasjednoj zoni Tounjskog rasjeda – V. zona. Na sjeveroistočnom, najnižem dijelu istraživanog područja, nastavljaju se fluviokrške doline (VI. zona) koje predstavljaju aktivne kanjonske doline Tounjčice i Kukače koje su relativno uske (120-150 m) i dubokog ureza u odnosu na razinu okolne zaravni (30-50 m).

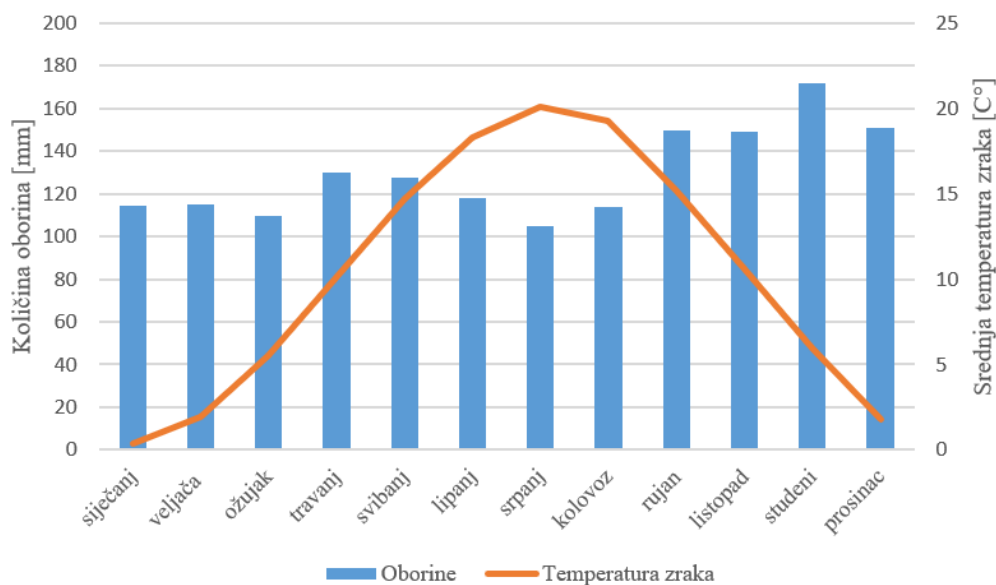


Slika 2.2. Prikaz fluviokrške morfologije istraživanog područja (I – zona površinskog otjecanja, II – aktivna ponorska zona, III – reliktna ponorska zona, IV – zona suhih dolina, V – izvorišna zona, VI – zona površinskog otjecanja; 1 – površinski vodeni tokovi, aktivni i povremeni, 2 – aktivni ponori, aktivni izvori, 3 – aktivne plitke fluviokrške doline, 4 – aktivne kanjonske fluviokrške doline, 5 – suhe fluviokrške doline, 6 – izvorišni obluci, 7 – aktivne ponorske doline, 8 – reliktnne ponorske doline, 9 – viseća doline, 10 – veća krška depresija, 11 – utvrđene podzemne veze, 12 – utvrđeni podzemni tokovi u špiljama, 13 – pretpostavljene podzemne veze, 14 – špiljski kanali (T – Tounjčica, ŠKT – Špilja u kamenolomu Tounj, M – jama Mandelaja), 15 – nadmorske visine aktivnih i reliktnih ponorskih dolina, 16 – nadmorske visine suhih dolina, 17 – nadmorska visina dna krške depresije, 18 – nadmorske visine špiljskih kanala, 19 – nadmorske visine izvora) (Bočić, 2020)

3. HIDROMETEOROLOŠKE ZNAČAJKE

Prema Köppenovoj klasifikaciji klime na istraživanom području prevladava umjereno topla vlažna klima s toplim ljetom (Cfb) (Filipčić, 2003). Ovaj klimatski tip na čitavom području obilježavaju sušna razdoblja ljeti uz dva približno jednaka kišovita razdoblja u drugim godišnjim dobima (JU Natura Viva, 2021). Ljeta su topla što znači da srednja temperatura najtoplijeg mjeseca iznosi manje od 22°C te da se tijekom najmanje četiri mjeseca bilježi srednja temperatura veća ili jednaka od 10°C (JU Natura Viva, 2021). Srednja srpanjska temperatura iznosi od 20 do 22°C, dok srednja siječanjska temperatura iznosi od 0 do 3°C (JU Natura Viva, 2021). Niske temperature za vrijeme zimskih mjeseci na istraživanom području posljedica su utjecaja nadmorske visine, ali i kotlinskog efekta. U konkavnim se oblicima reljefa, poput Ogulinskog polja, u hladnom dijelu godine nakuplja hladan zrak te su oni često hladniji od viših dijelova reljefa (Bočić i dr., 2016). Na istraživanom području se glavni maksimum oborina javlja u prosincu s time da je količina oborina visoka u svim jesenskim mjesecima, dok je glavni minimum oborina u srpnju (Bočić i dr., 2016).

Za istraživano područje, podaci o temperaturi zraka i podaci o količini oborina dobiveni su od Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ) izmjereni na meteorološkoj postaji Ogulin. Na slici 3.1. prikazane su srednje mjesečne vrijednosti temperature zraka i količine oborina za razdoblje od 1949. do 2022. godine. Analizom srednjih mjesečnih vrijednosti za razdoblje od 1949. do 2022. godine izdvojeni su - lipanj, srpanj i kolovoz kao najtopliji mjeseci, dok su kao najhladniji izdvojeni - prosinac, siječanj i veljača. Temperature u ljetnim mjesecima variraju između 18,3°C i 20,1°C, a temperature u zimskim mjesecima između 0,4°C i 1,9°C. Srednje količine oborina variraju od 104,6 mm za mjesec srpanj do 171,7 mm za mjesec studeni. Iako je količina oborina tijekom svih mjeseci ujednačena, to jest nema izraženih ekstrema, ipak je vidljivo da u jesenskim mjesecima pada najveća količina oborine.



Slika 3.1. Prikaz srednjih mjesečnih vrijednosti temperature zraka i količine oborina za razdoblje od 1949. do 2022. godine

Klimatološke značajke igraju ključnu ulogu u oblikovanju krških terena jer određuju intenzitet i brzinu trošenja karbonatnih stijena. Najvažniji faktori su temperatura zraka i količina oborina. Temperatura utječe na brzinu kemijskih reakcija, uključujući otapanje karbonatnih stijena. Oborine su ključni čimbenik u krškim procesima jer donose potrebnu količinu vode za odvijanje procesa okršavanja.

Analiziranjem mjesečnih i godišnjih temperatura zraka i količine oborina za razdoblje od 2014. do 2022. godine, uočene su veće promjene iz mjeseca u mjesec. Na slici 3.2. prikazane su prosječne mjesečne temperature zraka i mjesečne količine oborine za svaku pojedinačnu godinu od 2014. do 2022. godine. Temperatura zraka u razdoblju od 2014. do 2022. godine prati isti trend kao i u razdoblju od 1949. do 2022. godine. Razlike su vidljive u početnom dijelu pojedinih godina, jer umjesto da prosječna temperatura raste iz mjeseca u mjesec (kao što je to slučaj s prosjecima u razdoblju od 1949.-2022. godine), ona naglo padne u veljači / ožujku. Na slici 3.2. vidljivo je da su 2015. i 2018. godine u veljači zabilježeni takvi nagli padovi temperatura. Moguće je uočiti i kako se temperaturni maksimum sve više postiže u lipnju ili kolovozu, dok je prije bio u srpnju. Za razliku od temperaturnih promjena, puno veća promjena je vidljiva u količini i rasporedu oborina. Iz slike 3.2. moguće je uočiti da su u razdoblju od 2014. do 2022. godine oborine nepravilno raspoređene. Tijekom određenih godina količine oborina su potpuno nepravilno raspoređene pa je tako u 2019. godini zabilježena najveća količina oborina u svibnju, dok u veljači jedva da je bilo oborina. Nekih godina padnu veće količine oborina u prvom dijelu godine (2016. i 2018. godine), a nekih godina u drugom dijelu godine (2017. i 2020. godine).

Prema Strategiji prilagodbe klimatskim promjenama u Republici Hrvatskoj za razdoblje do 2040. godine s pogledom na 2070. godinu (NN 46/20), u projekcijama do 2040. godine se na širem području rijeke Mrežnice i Tounjčice predviđaju sljedeće klimatske promjene: smanjenje godišnjih količina oborina, povećanje broja sušnih razdoblja, neravnomjerni raspored oborina, povećana učestalost ekstrema, smanjenje broja dana pod snježnim pokrivačem te povećanje srednje godišnje temperature za 1 do 1,4°C. Glavni očekivani utjecaji klimatskih promjena na području rijeke Mrežnice i Tounjčice su poplave, kao posljedica veće učestalosti i intenziteta ekstremnih vremenskih prilika koje obilježavaju velike količine oborina u kratkom razdoblju. Kao posljedica smanjenja godišnjih količina oborina, povećanja srednjih godišnjih temperatura zraka i broja sušnih razdoblja doći će do povećanja evapotranspiracije, smanjenja površinskih i podzemnih otjecanja, a time i mogućeg smanjenja vodnih zaliha te pogoršanje kakvoće vode. Niži protoci rijeka kao posljedica smanjenja godišnjih količina oborina smanjuju sposobnost vode da prirodno ispiri ili razrjeđuje zagađivače, što može dovesti do povećanja njihove koncentracije u rijekama. Također, suša može smanjiti dotok svježje vode u podzemne rezervoare, što može rezultirati povećanom koncentracijom minerala i otopljenih tvari. Da je došlo do povećanja srednjih godišnjih temperatura zraka potvrđuje usporedba srednjih godišnjih temperatura zraka za razdoblje od 1949. do 2022. godine za koje iznosi 10,3°C i za razdoblje od 2014. do 2022. godine za koje iznosi 12,7°C (JU Natura Viva, 2021).



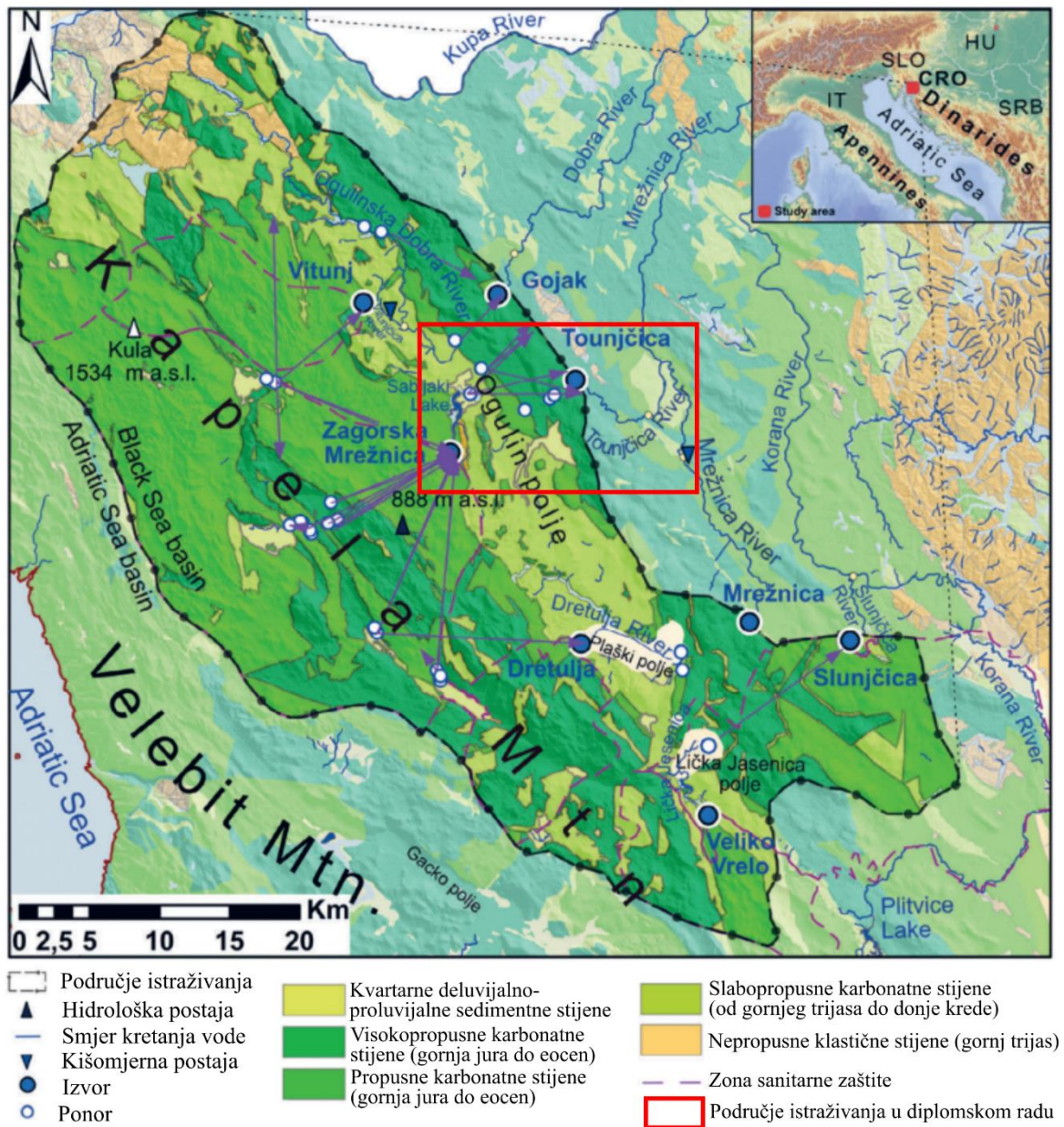
Slika 3.2. Prikaz prosječnih mjesečnih temperatura zraka i mjesečnih količina oborina za svaku pojedinačnu godinu od 2014. do 2022. godine

4. GEOLOŠKE I HIDROGEOLOŠKE ZNAČAJKE

Istraživano područje pripada geološki najkompleksnijem području Vanjskih Dinarida koje je tektonski vrlo složeno s karakterističnim dinarskim pravcem pružanja struktura naknadno poremećenih blok-tektonikom s poprečnim i dijagonalnim rasjedima i pukotinama. Prema Osnovnoj geološkoj karti list Ogulin (Velić i Sokač, 1981) unutar istraživanog područja najstariji utvrđeni stratigrafski član odgovara donjem trijasu, a otkriven je istočno od jezera Sabljaci, dok najmlađi članovi pripadaju kvartarnim naslagama. Boljat i dr. (2024b) su istraživano područje podijelili na sljedeće hidrogeološke skupine (slika 4.1.):

- kvartarne naslage – sastavljeno od stijenskih fragmenata i sitnozrnog materijala, međuzrnska poroznost;
- karbonatne stijene visoke propusnosti – pretežno predstavljeni vapnencima (jura i eocen), pukotinsko-kavernozna poroznost;
- propusne karbonatne stijene – pretežno predstavljene dolomitnim naslagama ili tankim slojevima dolomita (jura i kreda), pukotinsko-kavernozna poroznost;
- karbonati niske propusnosti – sastavljeni od naslaga koje karakterizira manja sposobnost okršavanja, a to su dolomiti, dolomitni vapnenac ili izmjene dolomita i vapnenca (od gornjeg trijasa do donje krede), pukotinsko-kavernozna poroznost.

Obzirom na prethodno spomenute naslage, na području istraživanja razvijeni su hidrogeološki odnosi koji su uvjetovani litologijom i tektonikom. Razlomljeni mezozojski vapnenci i dolomiti koji se nalaze na području Kapele te imaju veliku pukotinsko - kavernoznu poroznost predstavljaju prvo područje punjenja vodom. Ovisno o tektonskoj oštećenosti dolomita vode se kreću na niže i na većim pukotinama izlaze u obliku silaznih izvora u samim dolomitima. Ukoliko podzemna voda naiđe na manje tektonski oštećeni dolomit, tada će isto doći do izviranja vode na površinu. Na taj način na istraživanom području dolazi do izviranja podzemne vode na izvoru Zagorske Mrežnice. Tok površinskih voda formira se zbog nepropusnih naslaga ili zbog naslaga koje nisu tektonski oštećene. Naslage velike pukotinsko - kavernozne poroznosti su bogate krškim oblicima različitih dimenzija i predstavljaju medij kroz koji se površinske vode brzo infiltriraju. Voda nakon poniranja nastavlja teći kroz podzemlje te na kontaktu tih propusnih naslaga sa slabije propusnim materijalima ponovno izlazi na površinu.



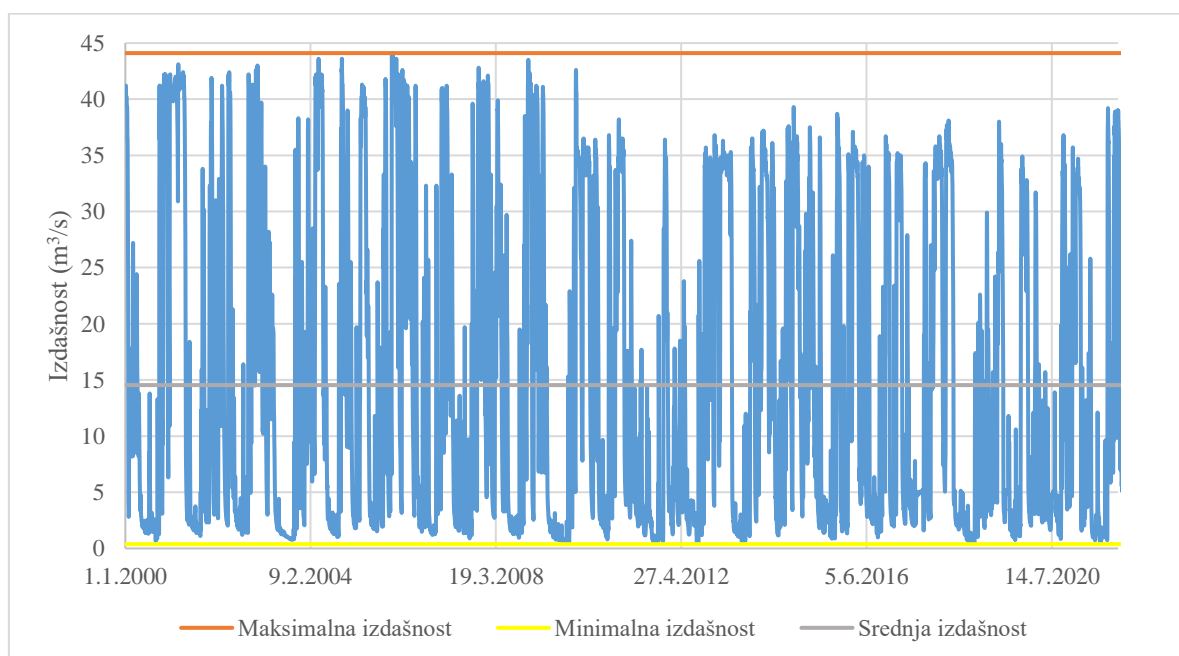
Slika 4.1. Hidrogeološka karta područja istraživanja (prema Boljat i dr., 2024b)

Izvor Tounjčice javlja se na kontaktu albskih foraminiferskih i aptskih prigrebenskih vapnenaca. Prihranjivanje izvora odvija se podzemnim dotokom vode iz krškog zaleđa pri čemu značajan udio čine vode koje infiltriraju na području Ogulina i Oštarija. Provođenjem trasiranja ponorne zone Zagorske Mrežnice potvrđena je povezanost s izvorom Tounjčice, ali i s izvorom Bistrac (desni pritok Gojačke Dobre). Međutim, izgradnja brane na Zagorskoj Mrežnici, formiranje jezera Sabljaci i preusmjerenje voda na HE Gojak, prekinula je te veze (osim u vrijeme velikih voda) što za posljedicu ima smanjivanje izdašnosti svih izvora koji su se prihranjivali vodom iz Zagorske Mrežnice. Osim tih podzemnih veza, na slici 4.1. prikazane su i ostale trasiranjem dokazane podzemne veze na širem području istraživanja.

4.1. Hidrološka analiza

Hidrološka analiza provedena je na osnovu podataka DHMZ-a o protocima za razdoblje od 2000. do 2022. godine na postajama Izvor Zagorske Mrežnice, Izvor Pećine, Izvor Bistrec, postaji Turkovići na rijeci Dobri, te na postajama Juzbašić i Mrzlo Polje na rijeci Mrežnici. Za sve postaje izrađeni su hidrogrami prikazani na slikama od 4.2. do 4.7. Postaja Juzbašić nalazi se uzvodno od utoka rijeke Tounjčice u Mrežnicu, a nizvodno od utoka Tounjčice u Mrežnicu, nalazi se postaja Mrzlo Polje. Obzirom da ne postoje mjerenja protoka rijeke Tounjčice, a između postaja Juzbašić i Mrzlo Polje rijeka Mrežnica nema drugih pritoka, razlika između dnevnih protoka izmjerenih na ta dva profila može se smatrati doprinosom rijeke Tounjčice.

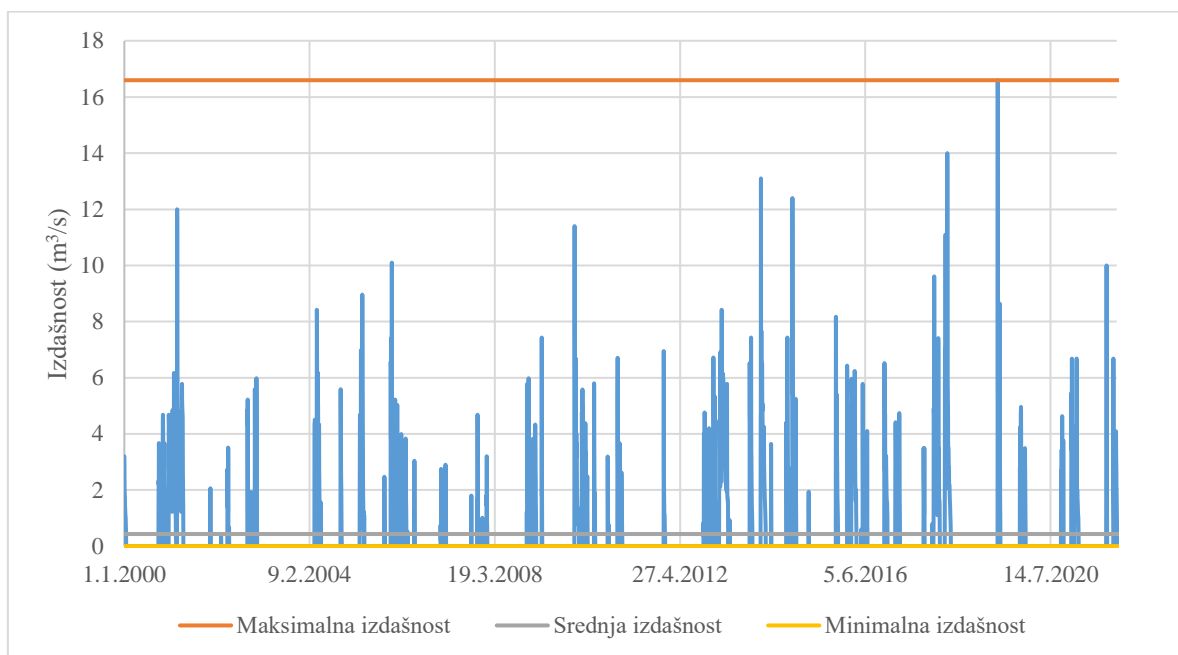
Prema izmjerenim količinama istjecanja na izvoru Zagorske Mrežnice u razdoblju od 2000. do 2022. godine, maksimalna zabilježena izdašnost iznosi $44,1 \text{ m}^3/\text{s}$, minimalna izdašnost $0,38 \text{ m}^3/\text{s}$, dok je srednja izdašnost $14,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Na slici 4.2. može se uočiti ujednačenost maksimalnih izdašnosti u vremenu što ukazuje na limitiranost kapaciteta istjecanja, što je u skladu i s prethodnim istraživanjima / mjerenjima od Boljat i dr. (2024a). Prema njihovom istraživanju dobiveni su sljedeći rezultati o izdašnosti za razdoblje od 2018. do 2022. godine: $Q_{\text{maks}}=49,15 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{min}}=0,30 \text{ m}^3/\text{s}$ i $Q_{\text{sr}}=14,16 \text{ m}^3/\text{s}$.



Slika 4.2. Srednje dnevne izdašnosti izvora Zagorske Mrežnice

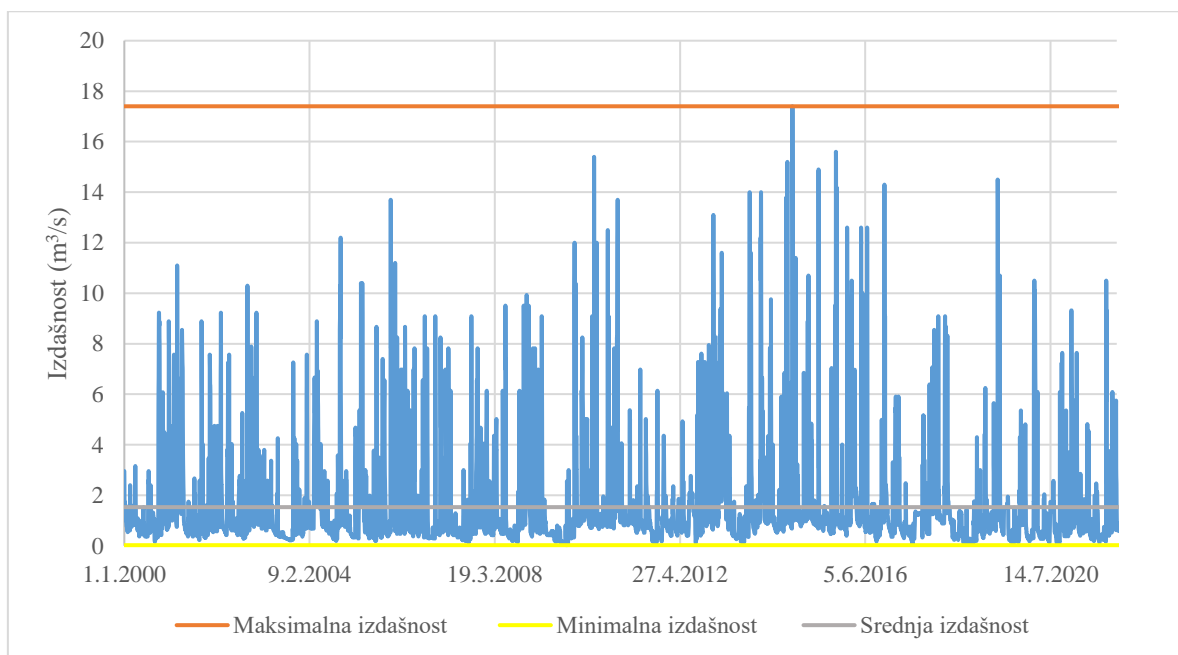
Na slici 4.3 prikazan je hidrogram za izvor Pećina. Iz hidrograma je vidljivo da izvor svake godine presušuje, ali se uočavaju i izrazito velike izdašnosti, što je glavna značajka

krških izvora. Maksimalna izdašnost na izvoru Pečina iznosi $16,6 \text{ m}^3/\text{s}$, a srednja izdašnost iznosi $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$.



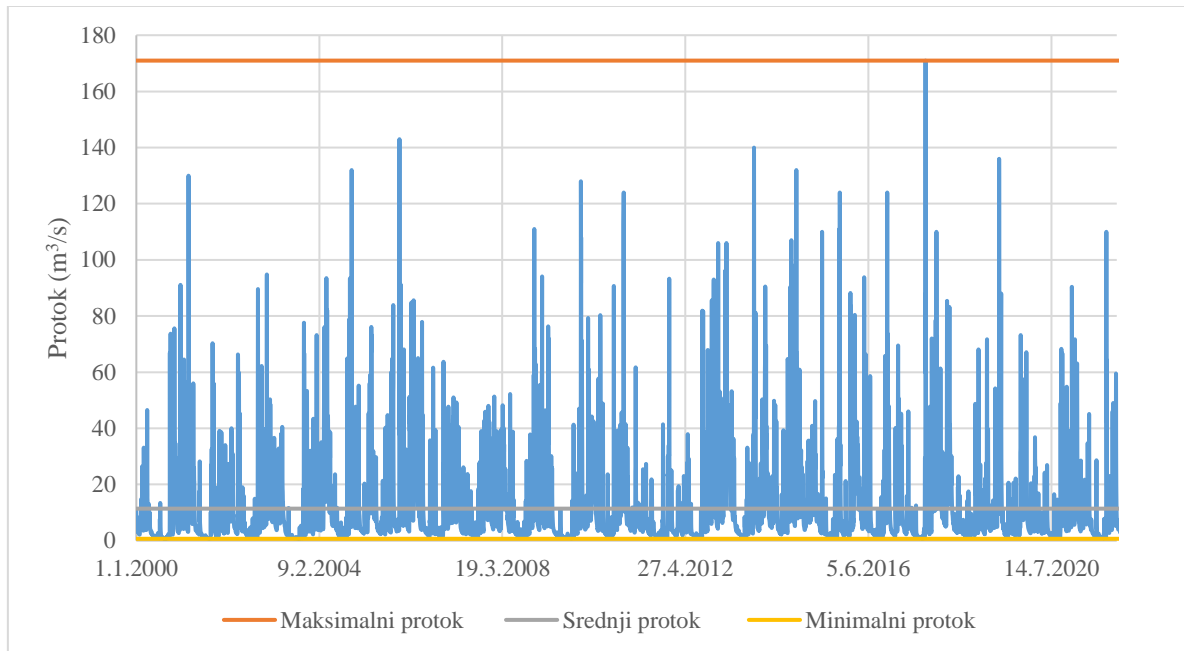
Slika 4.3. Srednje dnevne izdašnosti izvora Pečina

Na hidrogramu izvora Bistrec (slika 4.4) jasno su vidljivi ekstremni događaji. Za vrijeme promatranog razdoblja nije došlo do presušivanja izvora, ali su minimalne izdašnosti iznosile $0,025 \text{ m}^3/\text{s}$. Maksimalna izdašnost izvora iznosila je $17,4 \text{ m}^3/\text{s}$, a prosječna izdašnost $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$.



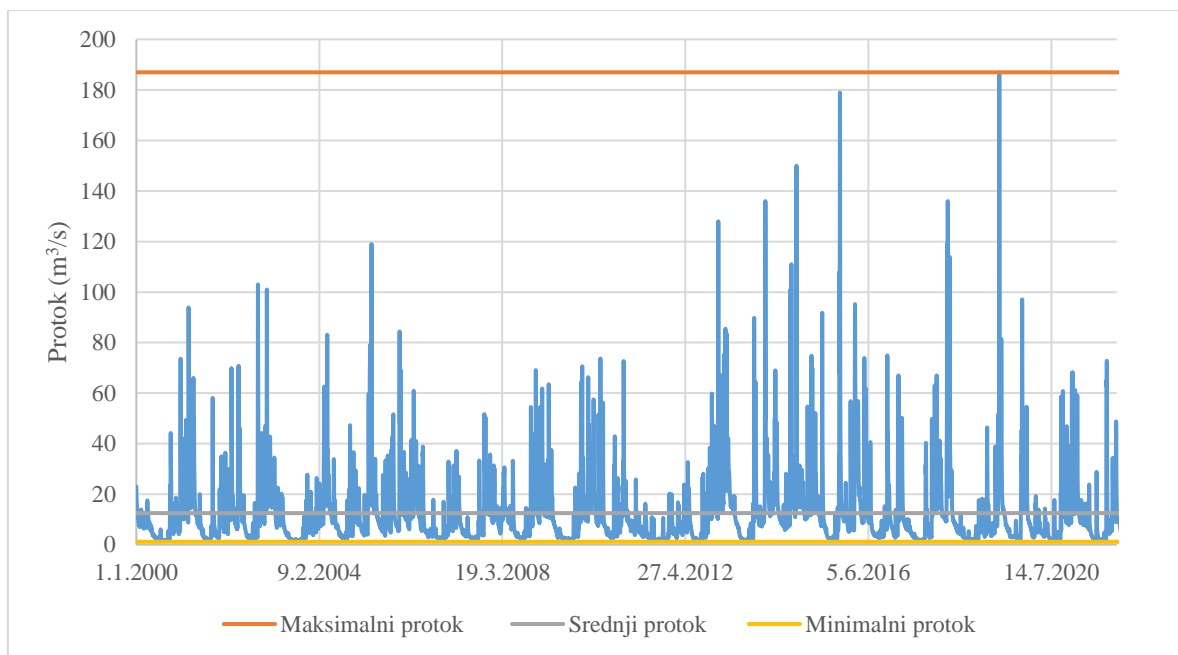
Slika 4.4. Srednje dnevne izdašnosti izvora Bistrec

Na postaji Turkovići na Ogulinskoj Dobri (slika 4.5) u razdoblju od 2000. do 2022. godine maksimalni izmjereni protok iznosio je 171 m³/s, minimalni protok 0,6 m³/s, a srednji protok iznosi 11,4 m³/s.



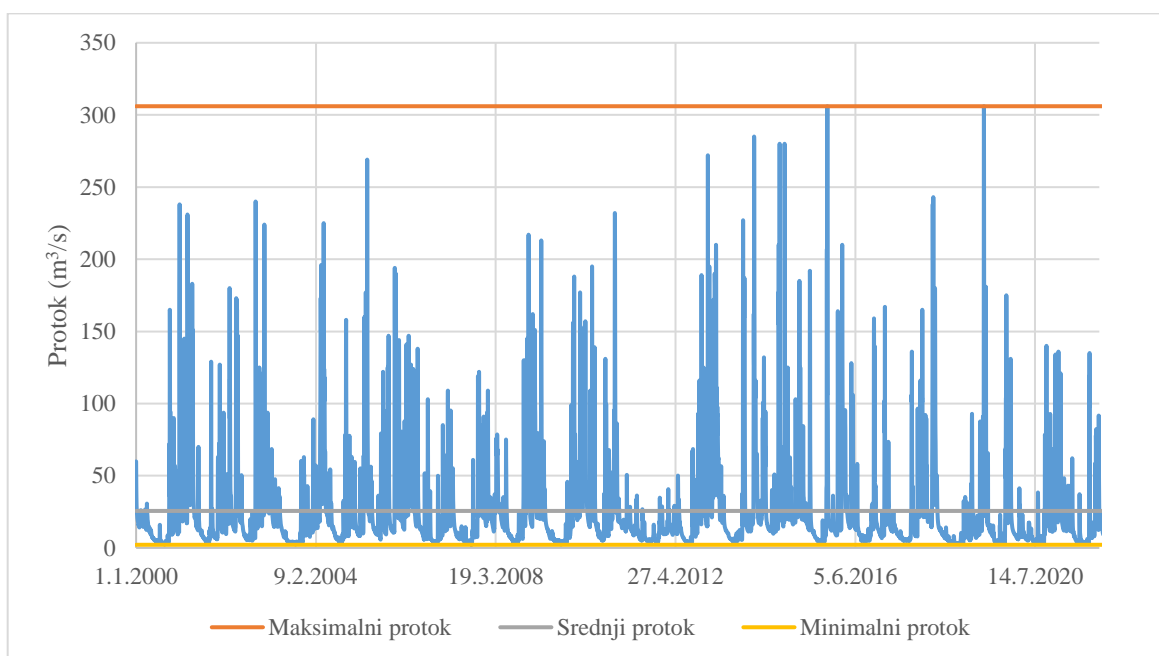
Slika 4.5. Srednji dnevni protoci na postaji Turkovići, Ogulinska Dobra

Hidrogram Juzbašići (slika 4.6) odnosi se na podatke s hidrološke postaje na Mrežnici koja se nalazi uzvodno od utoka Tounjčice. Ponovno su zabilježeni veliki vodni valovi koji su aktivirani nekim ekstremnim događajima. Zbog ekstremnih događaja, na postaji Juzbašići zabilježen je maksimalni protok u iznosu od 187 m³/s. Srednji protok iznosi 12,5 m³/s, a minimalni protok iznosi 1,15 m³/s.



Slika 4.6. Srednji dnevni protoci na postaji Juzbašići, Mrežnica

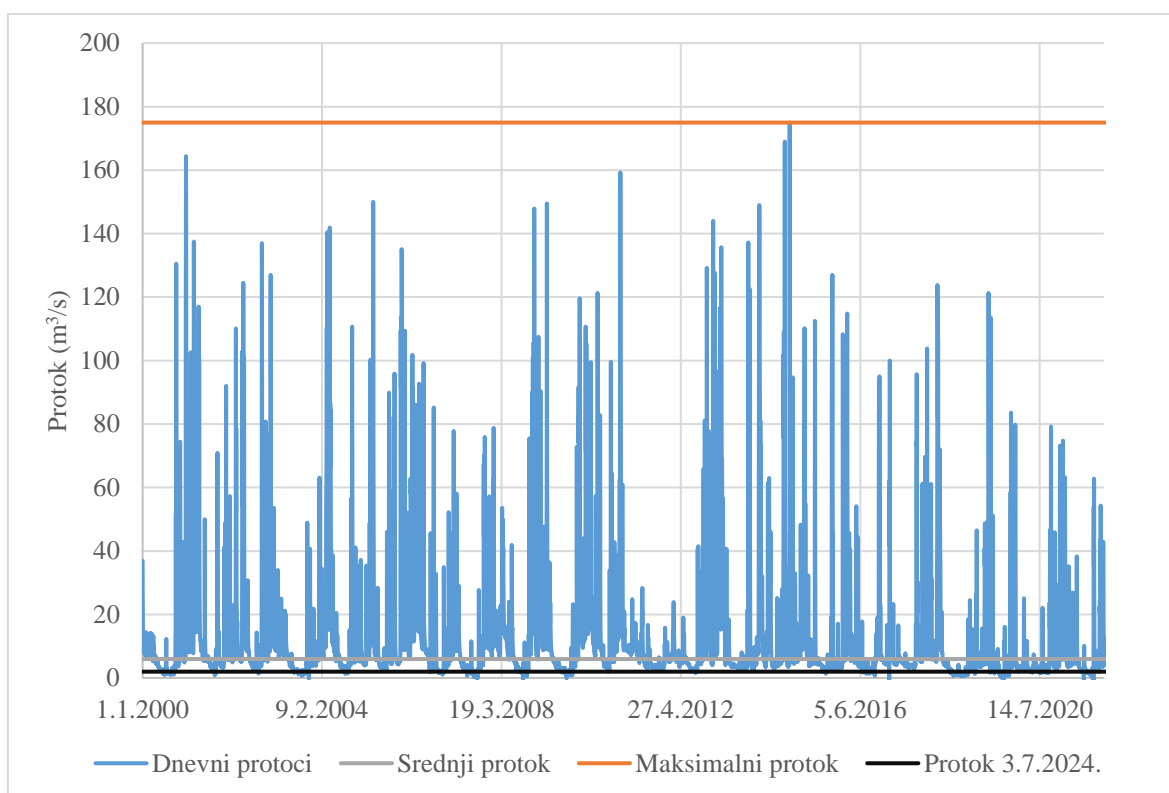
Hidrološka postaja Mrzlo Polje nalazi se nizvodno od utoka rijeke Tounjčice u Mrežnicu. Hidrogram je sličan hidrogramu za postaju Juzbašići, ali je vidljivo da je na postaji Mrzlo Polje zabilježen veći protok, nego na postaji Juzbašić (slika 4.7). Maksimalni protok iznosi $306 \text{ m}^3/\text{s}$, minimalni protok $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$, a srednji protok $25,6 \text{ m}^3/\text{s}$.



Slika 4.7. Srednji dnevni protoci na postaji Mrzlo Polje, Mrežnica

Na temelju protoka izmjerenih na postajama Juzbašić i Mrzlo Polje na Mrežnici, izračunat je protok Tounjčice. Postaja Juzbašić nalazi se uzvodno, prije ulijevanja Tounjčice u

Mrežnicu, dok se postaja Mrzlo Polje nalazi nizvodno od pritoka Tounjčice. Obzirom da između tih dviju postaja nema zabilježenih drugih izvora, odnosno pritoka Mrežnici, pretpostavljeno je da minimalno 90% vode dobivene razlikom u izmjerenom protoku na te dvije postaje pripada Tounjčici. Na slici 4.8. prikazan je hidrogram Tounjčice za razdoblje od 2000. do 2022. godine. Na hidrogramu je također označen protok na dan uzorkovanja (3.7.2024.) koji je iznosio $Q=1,973 \text{ m}^3/\text{s}$. Označavanjem na hidrogramu spomenuti protok, dobiveno je da je uzorkovanje provedeno u vrijeme niskih voda.



Slika 4.8. Izračunati srednji dnevni protoci rijeke Tounjčice

Da bi se izračunati podaci za protok Tounjčice mogli smatrati relevantnima, uspoređeni su s minimalnim, srednjim i maksimalnim podacima o izdašnosti Tounjčice preuzeti od Boljat i dr. (2024a) koji su proveli mjerenja u razdoblju od 2018. do 2022. godine. U tablici 4.1. prikazani su podaci o minimalnom, srednjem i maksimalnom protoku Tounjčice, dobiveni razlikom između mjernih postaja, te podaci o minimalnoj, srednjoj i maksimalnoj izdašnosti izvora Tounjčice prema Boljat i dr. (2024a) za isto vremensko razdoblje (od 01.01.2018. do 31.12.2022.). Vrijednosti srednjih izračunatih protoka nešto su veće od srednjih vrijednosti koje navode Boljat i dr. (2024a), dok su vrijednosti maksimalnih izračunatih protoka manje od mjerenih izdašnosti preuzetih od Boljat i dr. (2024a).

Minimalna izdašnost izvora Tounjčice prema Boljat i dr. (2024a) veća je od minimalnog protoka rijeke dobivenog razlikom između dviju postaja na Mrežnici. Do navedenih odstupanja vrlo vjerojatno dolazi radi zakašnjenja u mjerenju do kojih dolazi tijekom prolaska vodnih valova.

Tablica 4.1. Usporedba izračunatih i izmjerenih protoka Tounjčice

	<i>Q izračunati</i> (m ³ /s)	<i>Q izmjereni</i> (m ³ /s)
Q _{min}	0,06	0,20
Q _{sr}	8,66	7,98
Q _{maks}	123,80	140,00

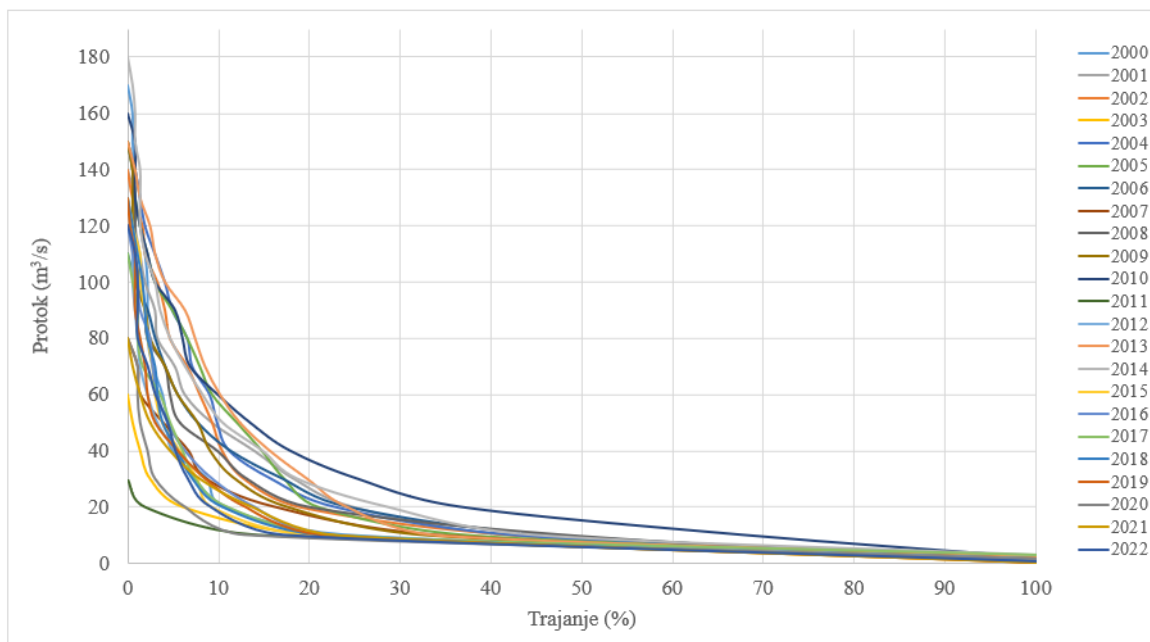
U izračunatim podacima za protok Tounjčice javljaju se i negativne vrijednosti. Negativne vrijednosti pojavljuju se jer se protok mjeri u isto vrijeme na obje postaje, te se povremeno radi prolaska vodnog vala može dogoditi „zakašnjenje“. Primjerice, na uzvodnoj postaji vodni val je zabilježen dok na nizvodnoj postaji nije jer tek stiže. Sve takve situacije, prepoznate kao negativne vrijednosti, u izračunatim protocima izuzete su iz niza podataka koji je išao u daljnju analizu. U nizu od 8036 podataka registrirano je tek 15 negativnih vrijednosti koje su sve prikazane u tablici 4.2.

Tablica 4.2. Negativne vrijednosti protoka Tounjčice

datum	protok (m ³ /s)	datum	protok (m ³ /s)	datum	protok (m ³ /s)
23.10.2003.	-0.22	2.9.2007.	-0.03	22.9.2019.	-0,21
25.8.2007.	-0.01	16.9.2008.	-0.51	18.7.2021.	-1,52
29.8.2007.	-0.08	15.9.2009.	-0.14	7.10.2021.	-2,71
30.8.2007.	-0.03	2.2.2017.	-4.4	10.6.2022.	-4
1.9.2007.	-0.02	31.8.2019.	-0.01	17.11.2022.	-2,39

Izradom krivulja trajanja protoka Tounjčice za razdoblje od 2000. do 2022. godine mogu se prepoznati ekstremne godine tj. sušne i vlažne. Ekstremni događaji (sušne ili vlažne godine) posljedica su ekstremnih oborinskih događaja. Na slici 4.9. prikazane su krivulje trajanja za svaku pojedinačnu godinu od 2000. do 2022. godine. Ističu se krivulje trajanja za 2011. godinu koja predstavlja ekstremno sušnu godinu i 2014. godinu koja predstavlja ekstremno vlažnu godinu. Navedene godine izravno koreliraju s godišnjim količinama

oborine i ocjenom DHMZ-a koji je 2011. godinu ocijenio kao vrlo sušnu do ekstremno sušnu, a 2014. godinu kao ekstremno kišnu (DHMZ 2012, 2015).



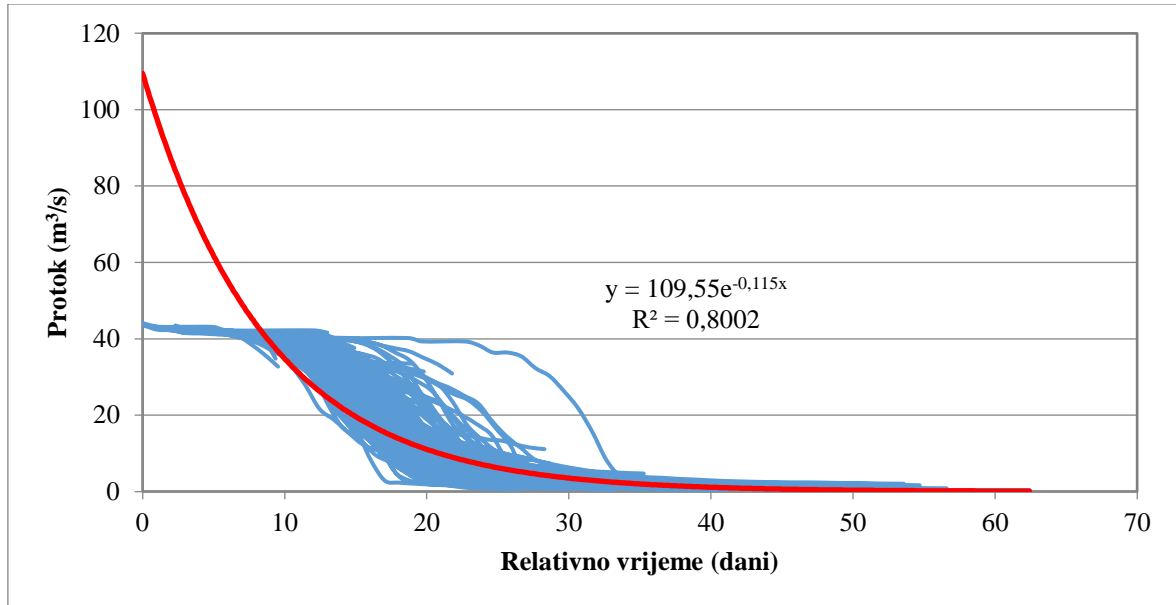
Slika 4.9. Krivulja trajanja protoka rijeke Tounjčice

4.2. Recesijska analiza

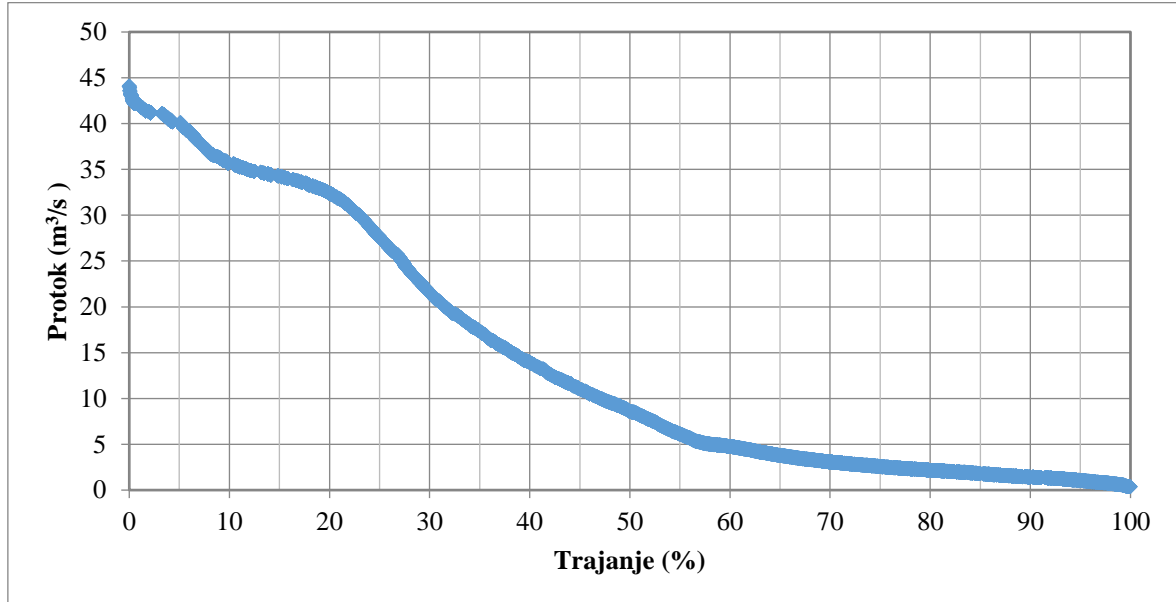
Na vremenskim nizovima protoka izmjerenih na hidrološkim postajama i na vremenskom nizu izračunatih protoka rijeke Tounjčice primijenjena je recesijska analiza. Određene su glavne recesijske krivulje konstruirane pomoću metode temeljene na trigonometrijskim funkcijama (Posavec i dr., 2017). U cilju pridobivanja što boljih rezultata u pojedinim slučajevima pristupilo se izradi višedijelne glavne krivulje recesije (dvodijelna ili trodijelna). Za konstrukciju takve višedijelne krivulje koristila se potpuno automatizirana “matching strip” metoda (Posavec i dr., 2010).

Na slici 4.10. prikazana je glavna recesijska krivulja izdašnosti izvora Zagorske Mrežnice. Može se zapaziti neobična dinamika istjecanja vode na izvoru Zagorske Mrežnice. Izvor Zagorske Mrežnice nema zabilježenih većih izdašnosti od 45 m³/s uz dugo (netipično za krške izvore) zadržavanje velikih voda. Ranija istraživanja od Boljat i dr. (2024a) konstatiraju da je istjecanje velikih voda limitirano kapacitetom pukotina. Obzirom da jedna glavna recesijska krivulja ne opisuje dobro istjecanje velikih voda, izrađena je višedijelna glavna recesijska krivulja temeljem krivulje trajanja (slika 4.11). Prvo je izrađena podjela na dva dijela (slika 4.12), a zatim na tri (slika 4.13). Iako jedna glavna recesijska krivulja ima najviši koeficijent determinacije, vidljivo je da u dijelu koji opisuje velike vode ne zadovoljava. Podjelom na dva dijela koeficijenti determinacije su manji, ali dobivene

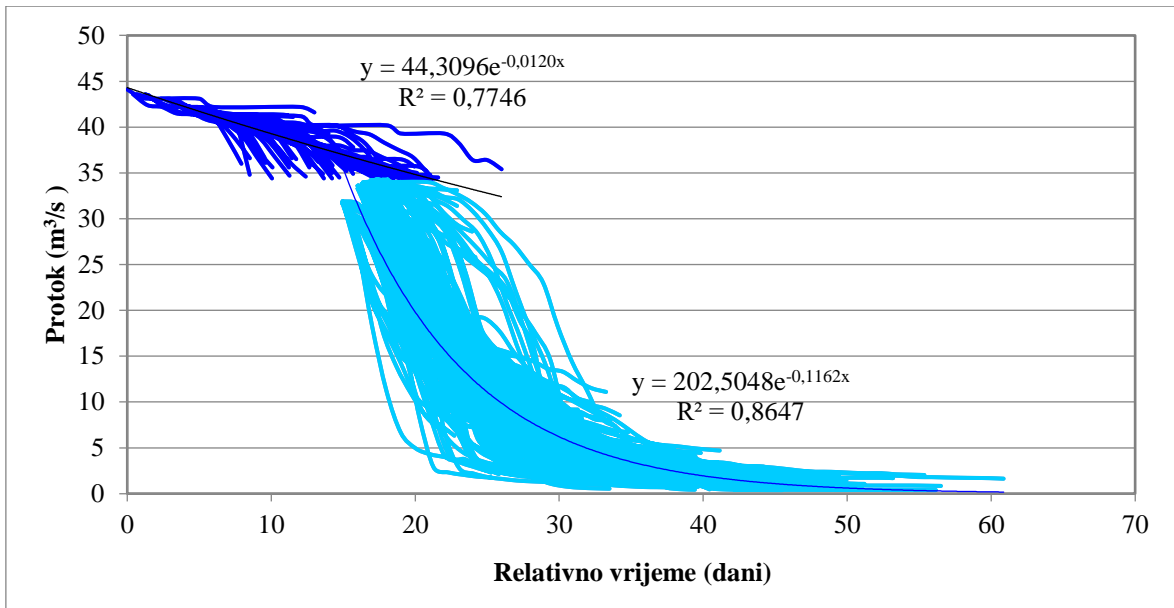
funkcije daju bolje preklapanje s mjerenim podacima. Trodijelna glavna recesijska krivulja daje najbolje vizualno preklapanje s mjerenim podacima iako ima najmanje koeficijente determinacije.



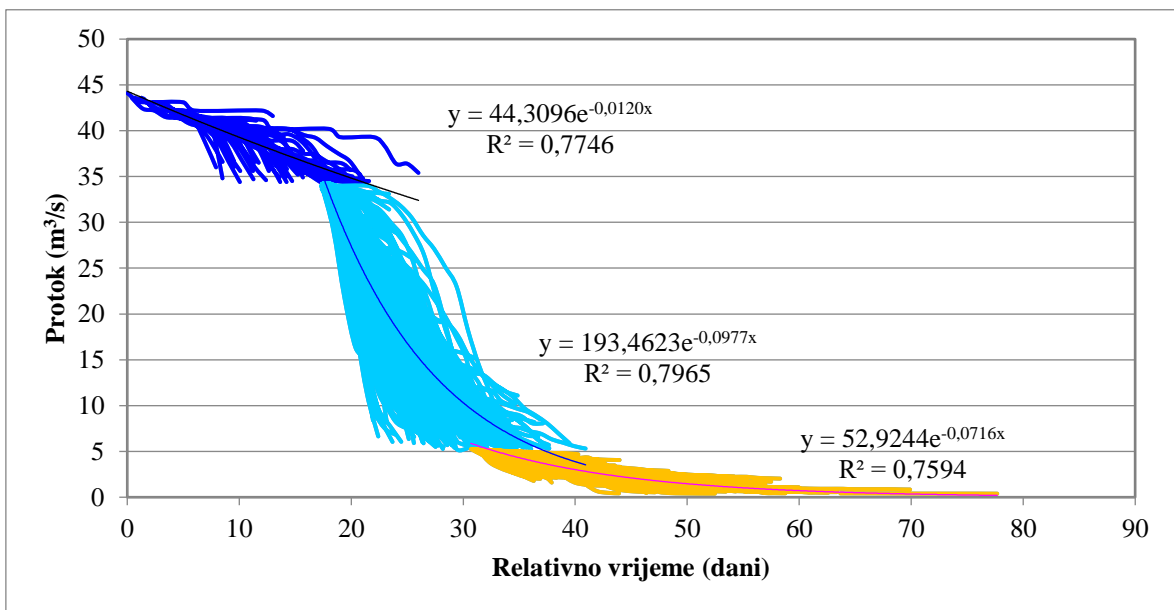
Slika 4.10. Glavna recesijska krivulja za izvor Zagorske Mrežnice



Slika 4.11. Krivulja trajanja izvora Zagorske Mrežnice

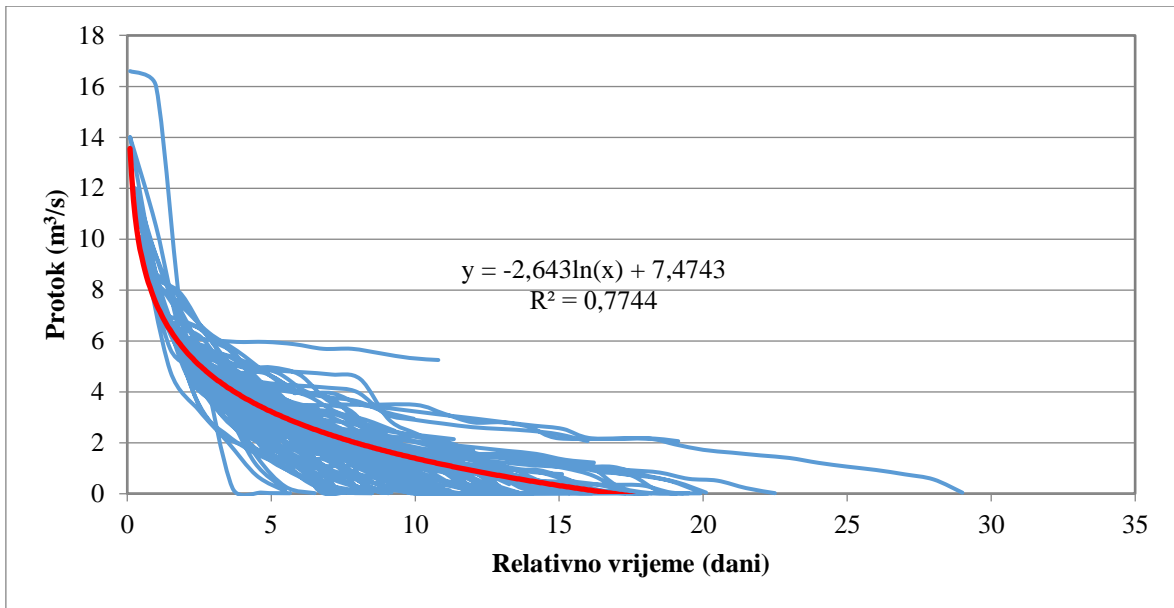


Slika 4.12. Dvodijelna glavna recesijska krivulja izvora Zagorske Mrežnice



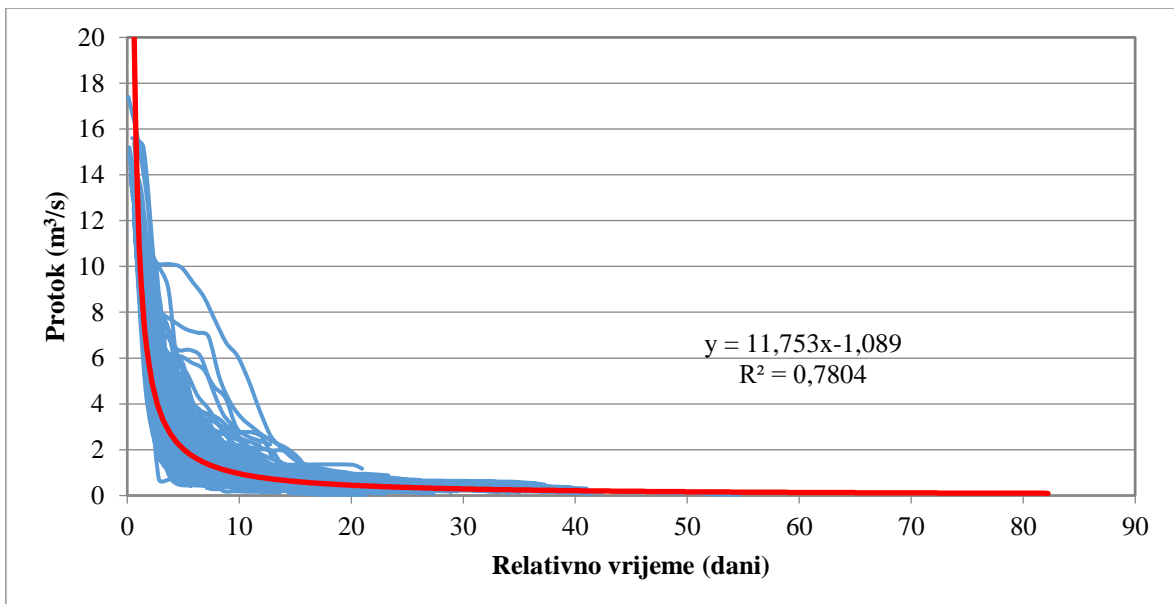
Slika 4.13. Trodiyelna glavna recesijska krivulja za izvor Zagorske Mrežnice

Na slici 4.14. prikazana je glavna recesijska krivulja za izvor Pećina. Dobivena glavna recesijska krivulja dobro zadovoljava i koeficijentom determinacije kao i vizualnim preklapanjem s mjerenim podacima. Izradom višedijelnih krivulja nije se postigao bolji rezultat.

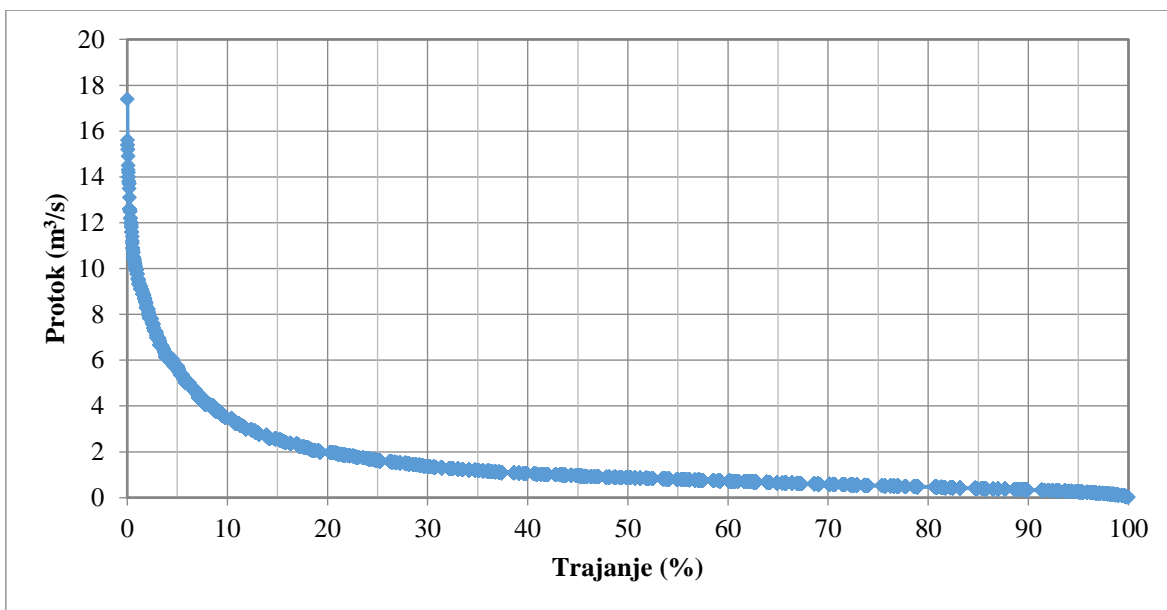


Slika 4.14. Glavna recesijska krivulja izvora Pećina

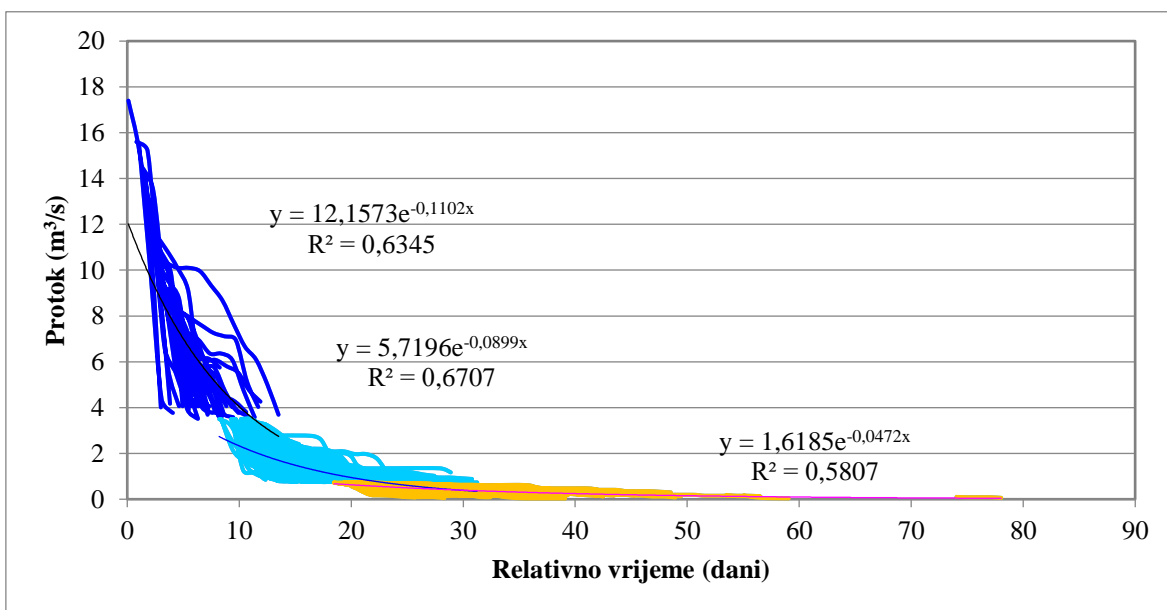
Za izvor Bistrec izrađena je glavna recesijska krivulja (slika 4.15). Glavnom recesijskom krivuljom dobiven je zadovoljavajući koeficijent determinacije, ali se pokušalo izradom višedijelne krivulje poboljšati rezultat temeljem krivulje trajanja (4.16). Izradom trodijelne krivulje (4.17) dobiveni su lošiji koeficijenti determinacije i slabije vizualno preklapanje s mjerenim podacima.



Slika 4.15. Glavna recesijska krivulja izvora Bistrec

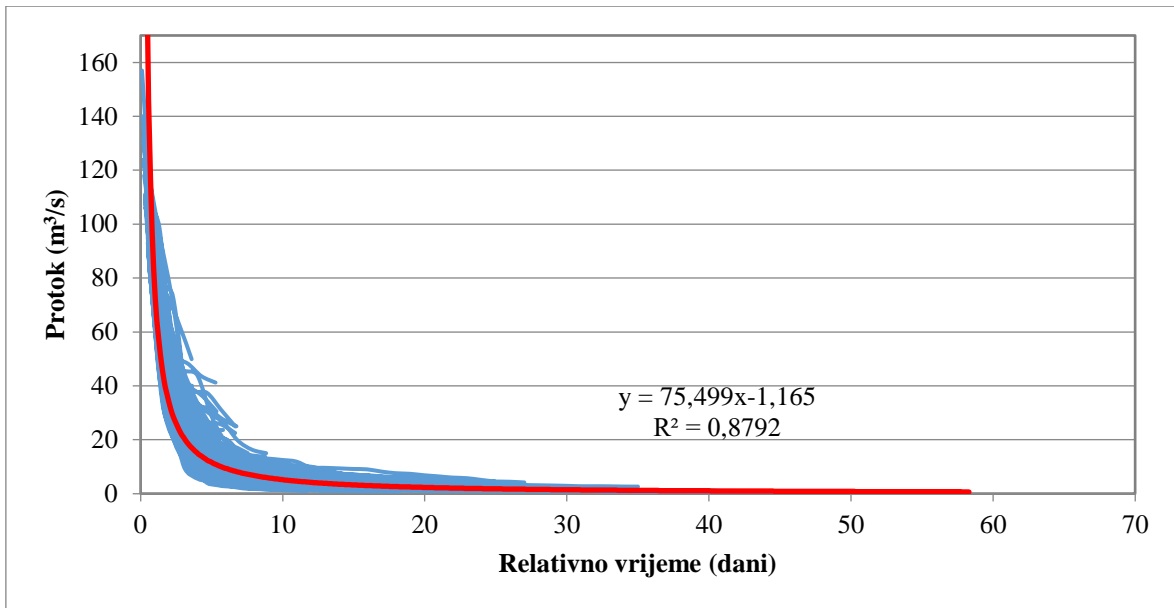


Slika 4.16. Krivulja trajanja izvora Bistrec

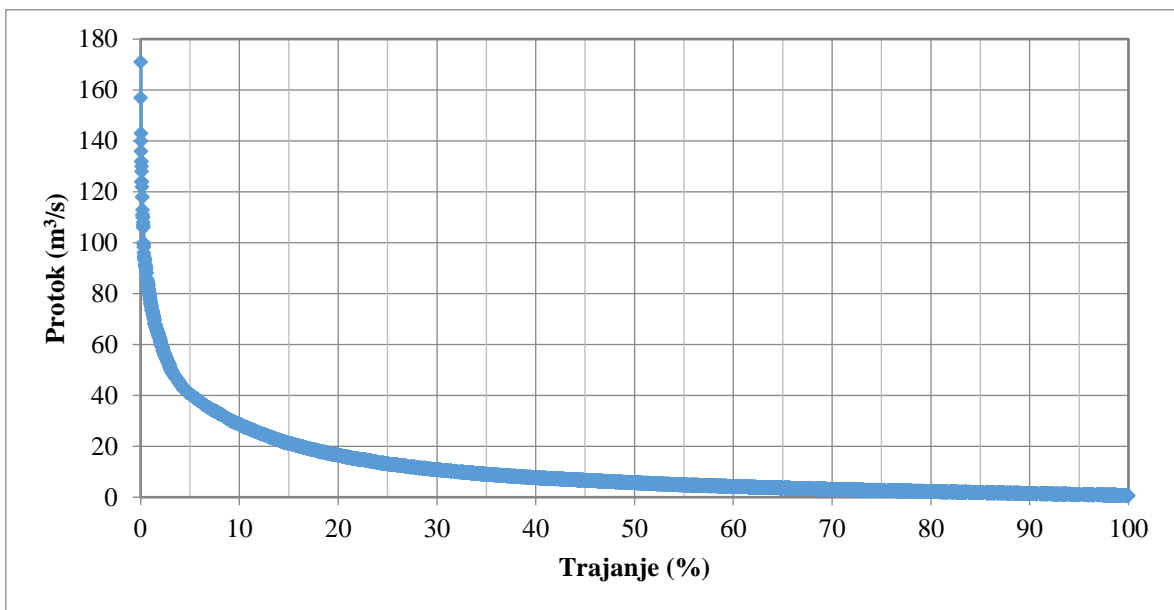


Slika 4.17. Trodijelna glavna recesijska krivulja za izvor Bistrec

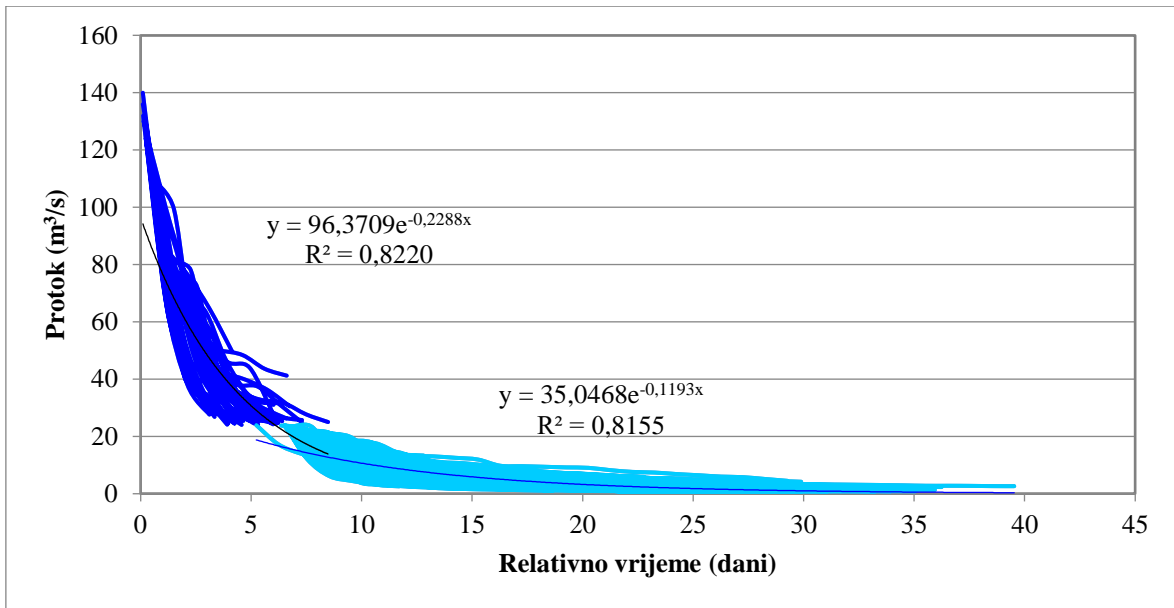
Izradom glavne recesijske krivulje za protoke s hidrološke postaje Turkovići (4.18) dobiven je zadovoljavajući koeficijent determinacije, kao i zadovoljavajuće vizualno preklapanje s mjerenim podacima. Temeljem krivulje trajanja (4.19) izrađena je dvodijelna glavna recesijska krivulja (4.20), ali s lošijim koeficijentima determinacije. Dvodijelna krivulja se vizualno ne preklapa najbolje s mjerenim podacima. Vizualno ne zadovoljava opis velikih voda.



Slika 4.18. Glavna recesijska krivulja za postaju Turkovići

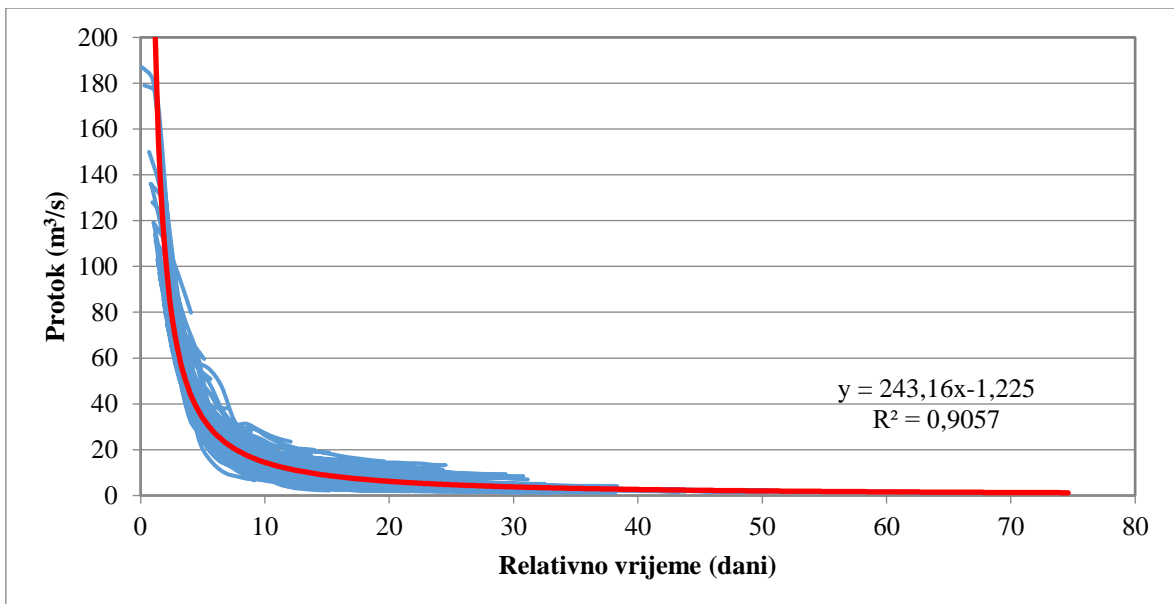


Slika 4.19. Krivulja trajanja za postaju Turkovići

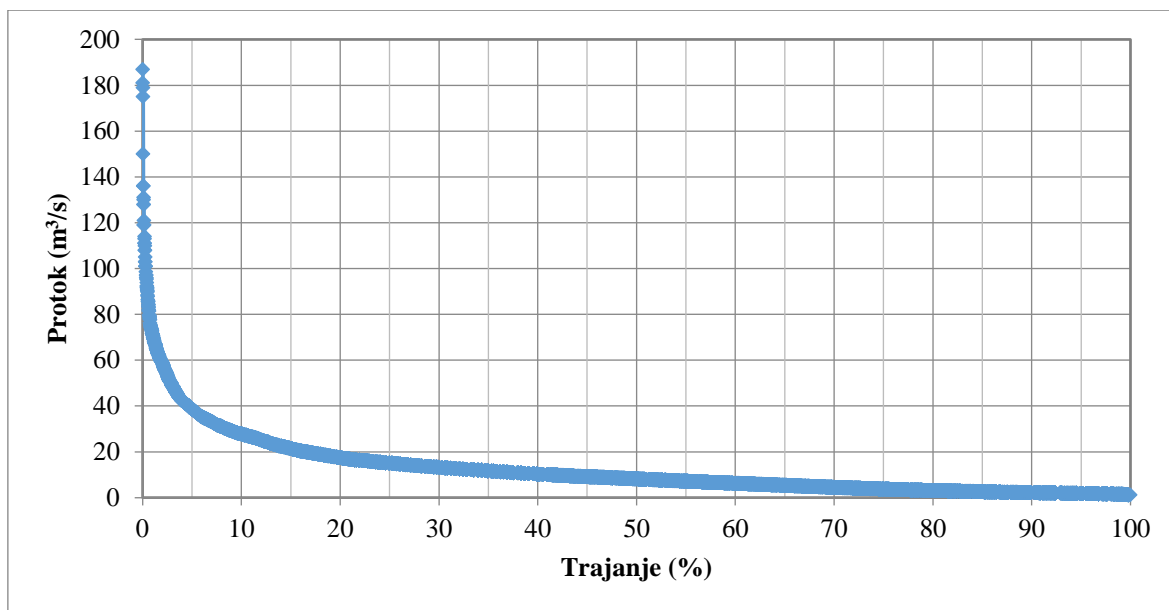


Slika 4.20. Dvodijelna glavna recesijska krivulja za postaju Turkovići

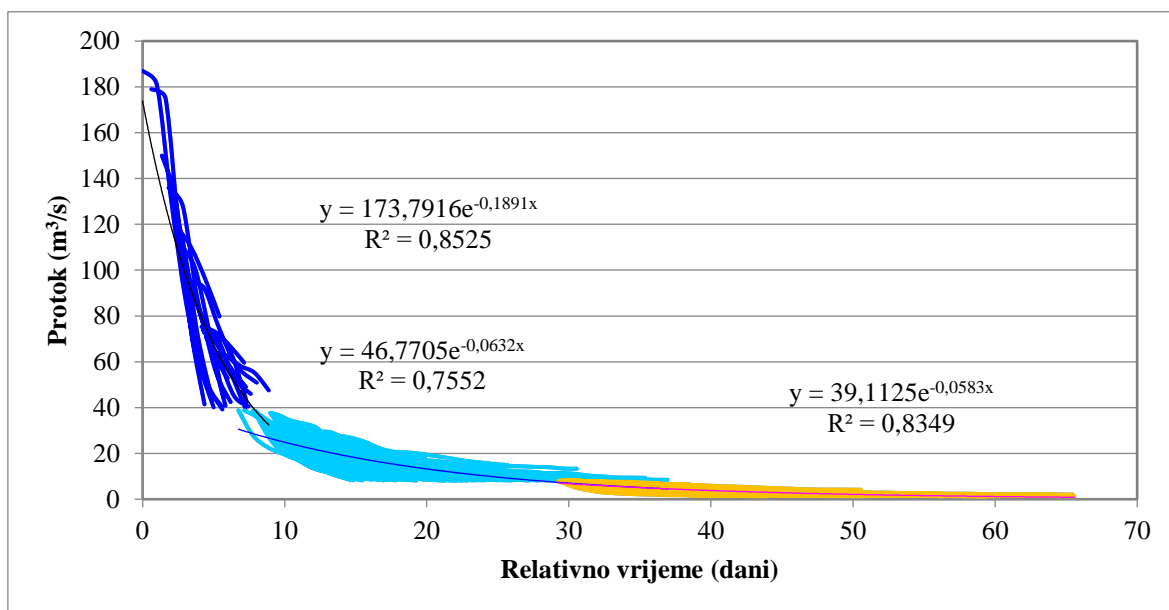
Za hidrološku postaju Juzbašić izrađene su glavna recesijska krivulja (4.21), te temeljem krivulje trajanja (4.22) i trodijelna krivulja (4.23). Kao i u prethodnom slučaju, ponovno jedna glavna recesijska krivulja prikazuje najveći koeficijent determinacije i najbolje vizualno preklapanje. Izradom trodijelne krivulje je dobiven lošiji koeficijent determinacije i lošije vizualno preklapanje s mjerenim podacima.



Slika 4.21. Glavna recesijska krivulja za postaju Juzbašići

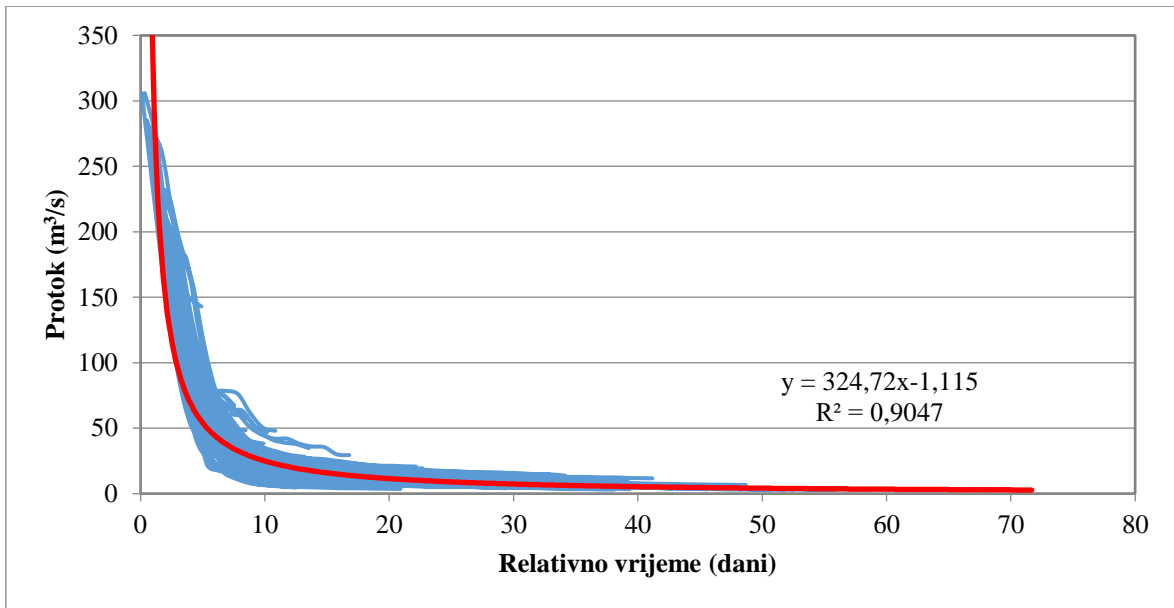


Slika 4.22. Krivulja trajanja za postaju Juzbašići

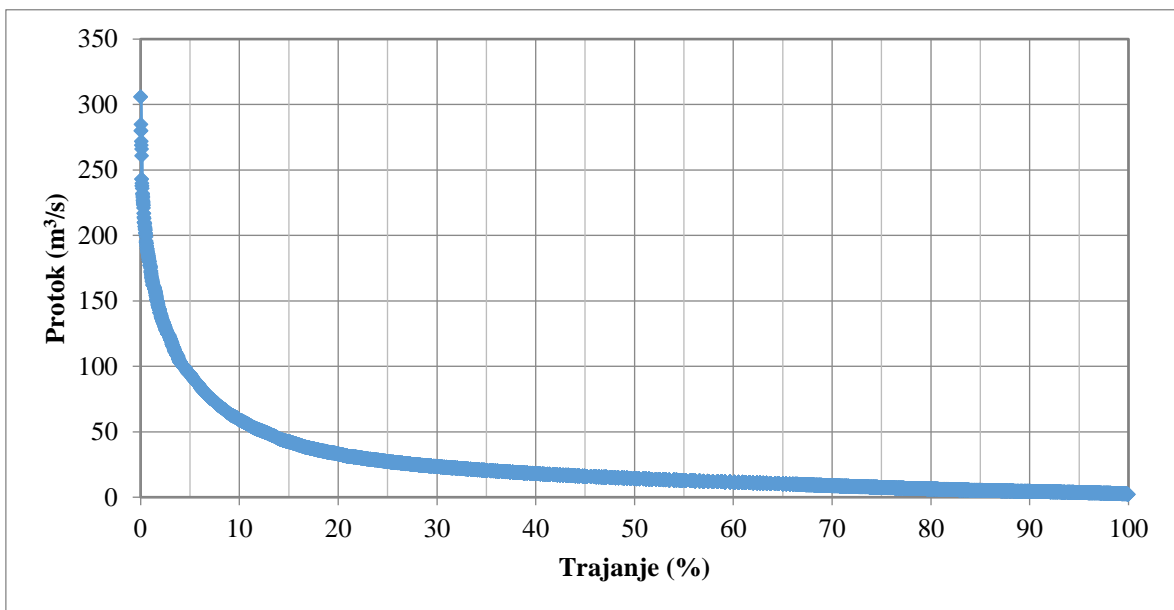


Slika 4.23. Trodijelna glavna recesijska krivulja za postaju Juzbašići

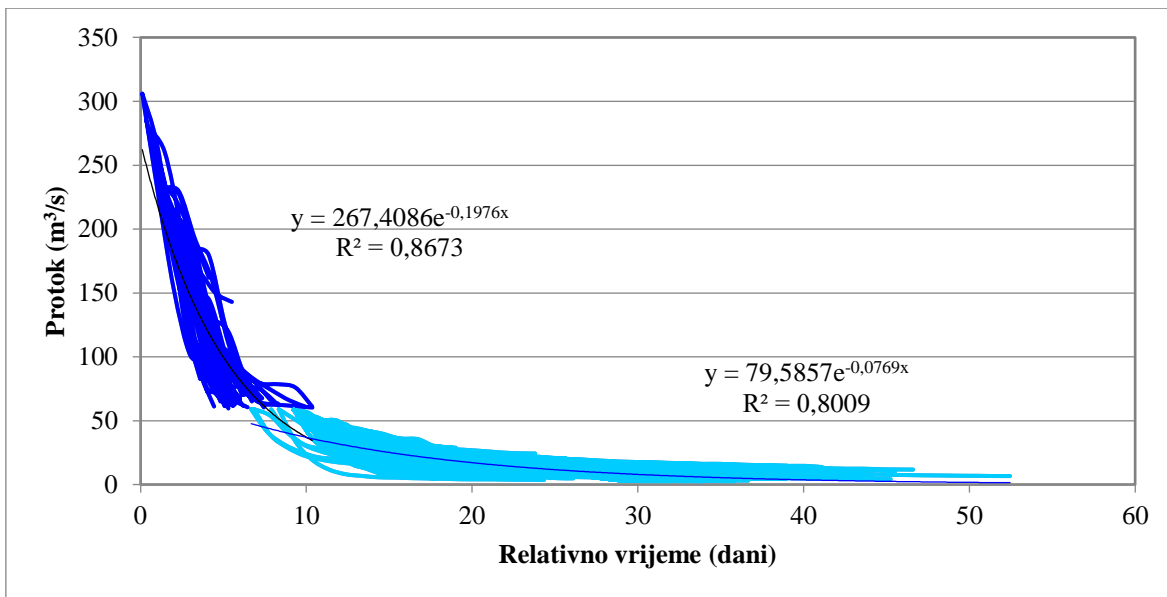
Na slici 4.24 prikazana je glavna recesijska krivulja za hidrološku postaju Mrzlo Polje. Zatim je na temelju krivulje trajanja (4.25) izrađena dvodijelna krivulja (4.26). Glavnom recesijskom krivuljom dobiven je visok koeficijent determinacije. Vizualno preklapanje s mjerenim podacima je nešto lošije. Izradom dvodijelne krivulje dobiveni su manji koeficijenti determinacije. Vizualno preklapanje s mjerenim podacima dobiveno dvodijelnom krivuljom nije zadovoljavajuće jer ne opisuje dobro velike vode.



Slika 4.24. Glavna recesijska krivulja za postaju Mrzlo Polje

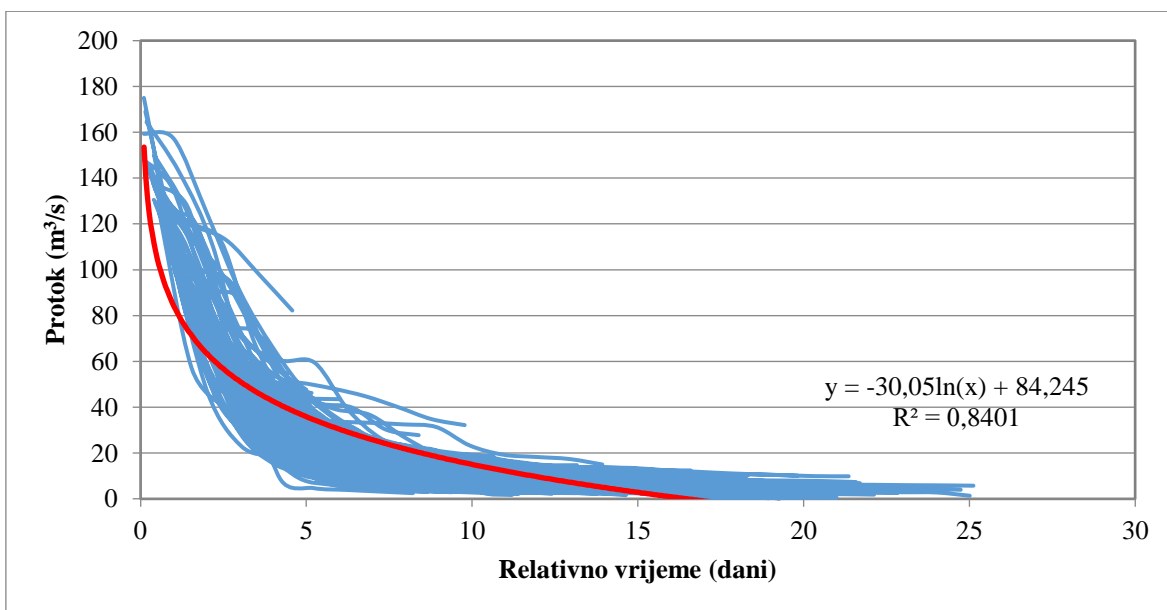


Slika 4.25. Krivulja trajanja za postaju Mrzlo Polje

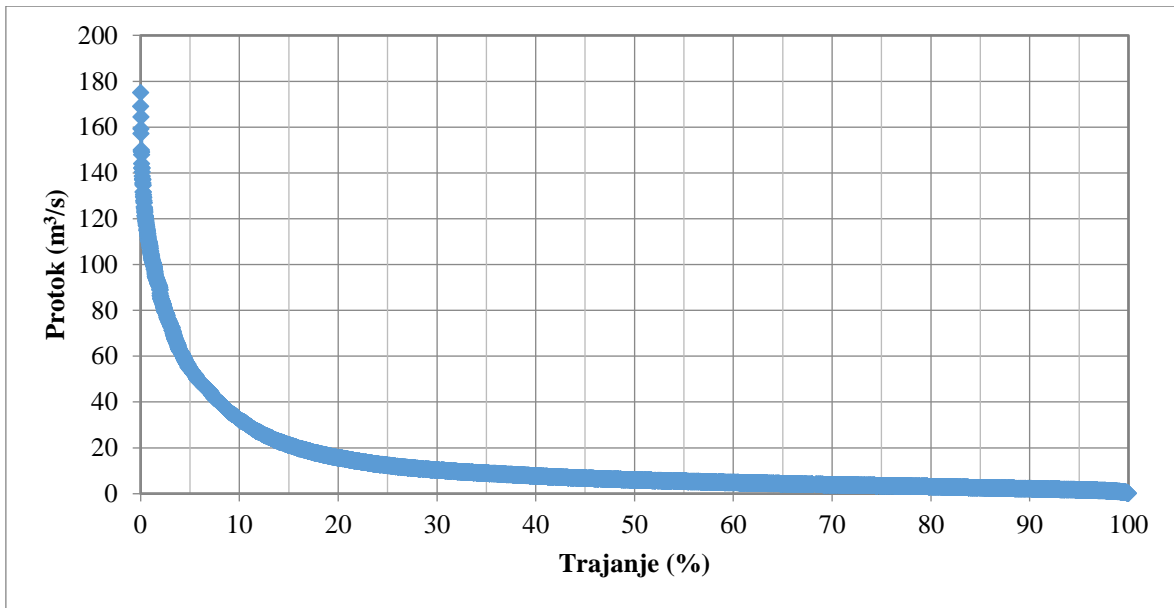


Slika 4.26. Dvodijelna glavna recesijska krivulja za postaju Mrzlo Polje

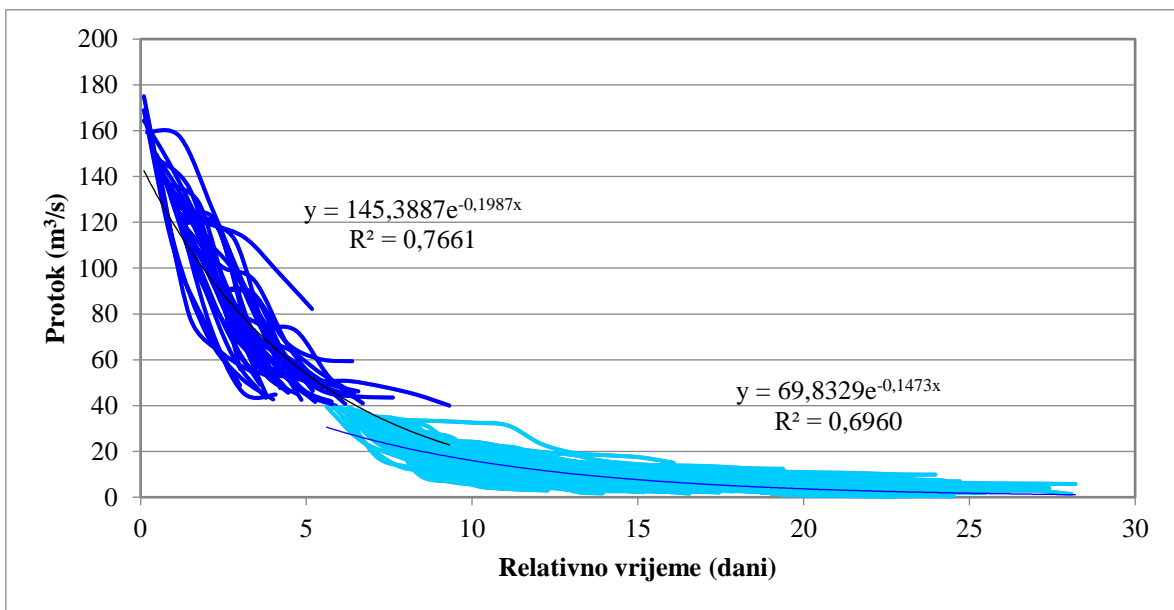
Glavna recesijska krivulja za Tounjčicu prikazana na slici 4.27 ima visoki koeficijent determinacije, ali se vizualno ne preklapa najbolje s mjerenim podacima. U pokušaju dobivanja boljeg vizualnog preklapanja, glavna recesijska krivulja podijeljena je na temelju krivulje trajanja (slika 4.28) na dva dijela (slika 4.29). Dijeljenjem glavne recesijske krivulje na dva dijela dobiveno je neznatno bolje vizualno preklapanje s mjerenim podacima, a s nižim koeficijentom determinacije.



Slika 4.27. Glavna recesijska krivulja za Tounjčicu



Slika 4.28. Krivulja trajanja za Tounjčicu



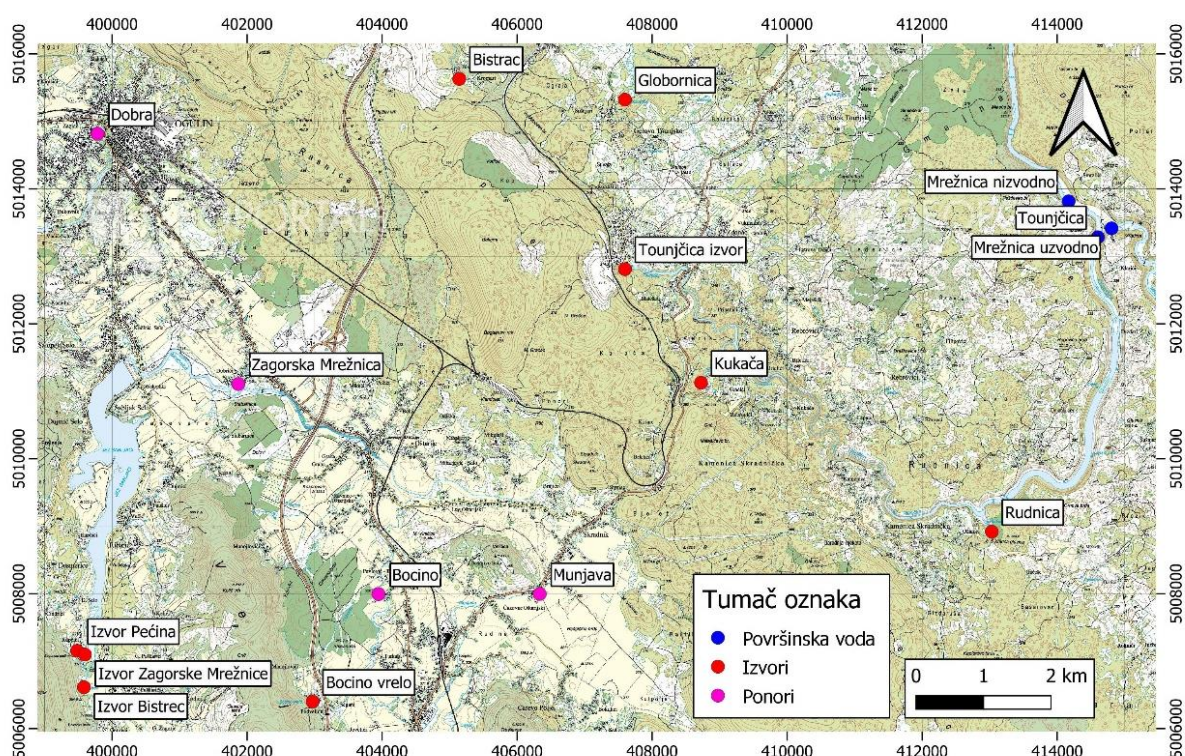
Slika 4.29. Dvodijelna glavna recesijska krivulja za Tounjčicu

Recesijska analiza primjenom automatizirane matching strip metode, kojom se traži funkcija koja će najbolje opisati istjecanje na izvoru tj. protok kroz poprečni presjek površinskog vodotoka tijekom duljeg sušnog razdoblja, pokazala je da se za sve analizirane vremenske nizove može izraditi jedna glavna recesijska krivulja uz pripadajuće visoke koeficijente determinacije.

5. HIDROGEOKEMIJSKA ISTRAŽIVANJA

5.1. Terenski rad i uzorkovanje

U svrhu izrade diplomskog rada obavljeno je prikupljanje uzoraka vode na širem području izvora Tounjčice. Uzorkovanje je obavljeno 3.7.2024. godine i prikupljeno je 16 uzoraka vode na lokacijama prikazanim na slici 5.1. Uzorkovanju je prethodilo dulje sušno razdoblje. Na dan uzorkovanja također je bilo suho i sunčano vrijeme, ali nekoliko dana ranije je pala slaba kiša koja nije značajno utjecala na promjene vodostaja. Za sva mjesta na kojima je provedeno uzorkovanje je preuzeta nadmorska visina s Hrvatske osnovne karte 1: 5000 (DGU, 2011).



Slika 5.1. Lokacije uzorkovanja (podloga: topografska karta 2011. – Geoportal DGU)

Vode **rijeke Ogulinske Dobre** koje poniru u Đulin ponor uzorkovane su zbog neprohodnosti terena 100-tinjak metara uzvodnije od samog ponora. Mjesto uzorkovanja (204 m n. m.) i Đulin ponor prikazani su na slici 5.2. Rijeka Dobra se hidrogeološki može podijeliti u dvije cjeline: Ogulinska Dobra i Gojačka Dobra. Ogulinskom Dobrom smatra se tok rijeke koji ponire u Đulinom ponoru, a Gojačka Dobra je prirodni nastavak Ogulinske Dobre koja nakon kraćeg tečenja vode kroz podzemlje ponovno izvire u selu Gojak. Đulin ponor nalazi se na kontaktu gornjotrijaskih dolomita i jurskih vapnenaca. Ovaj kontakt

između slabije propusnih i propusnih karbonatnih naslaga omogućuje poniranje rijeke Dobre u podzemlje.



Slika 5.2. Mjesto uzorkovanja i ponor rijeke Dobre (Đulin ponor)

Sam **izvor Zagorske Mrežnice** (319 m n. m.) je ograđen radi zaštite izvora tj. postrojenja za crpljenje vode za javnu vodoopskrbu. Izvor se za vodoopskrbu koristi od 1956. godine, a voda koja se crpi na tom vodocrpilištu napaja gotovo cijelo Ogulinsko područje. Uzorak vode je prikupljen neposredno nizvodno od zaštitne ograde. Na slici 5.3. prikazan je izvor Zagorske Mrežnice, dok je na slici 5.4. prikazan tok Zagorske Mrežnice nizvodno od mjesta uzorkovanja. Izvor je stalan i uzlaznog tipa. Na površini formira jezerce. Izvorišno područje izgrađeno je od jurskih vapnenaca.

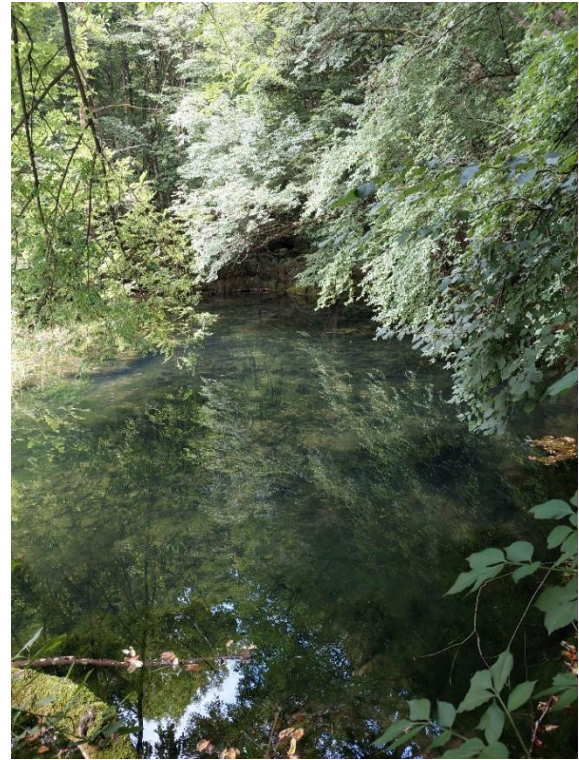


Slika 5.3. Izvor Zagorske Mrežnice



Slika 5.4. Zagorska Mrežnica nizvodno od izvora

Izvor Pećina (320,9 m n. m.) je još jedan od izvora rijeke Zagorske Mrežnice. Lijeve pritoke Zagorske Mrežnice kojoj je izvor nekoliko metara udaljena od glavnog izvora Zagorske Mrežnice. Izvor je dobio svoje ime Pećina zbog špilje koja se nalazi na izvoru. Na dan uzorkovanja voda nije izvirala iz špilje gdje je postavljena i vodomjerna letva, već nizvodnije formirajući površinski tok koji se nakon 130 m ulijeva u tok Zagorske Mrežnice (slika 5.5).



Slika 5.5. Izvor Pećina

Izvor Bistrec (321,9 m n. m.) formira potok Bistrac te je taj potok desna pritoka Zagorske Mrežnice. Uzorak je prikupljen na samom izvoru koji se nalazi neposredno uz cestu. Izvor Bistrec prikazan je na slici 5.6.



Slika 5.6. Izvor Bistrec

Rijeka Zagorska Mrežnica je prije izgradnje umjetnog jezera Sabljaci svoj prirodni tok formirala od Ogulinskog Zagorja, kroz Otok Oštarijski pa do Oštarija gdje je ponirala. Sada je tok rijeke prekinut jer je reguliran umjetnim jezerom od kuda se voda podzemnim tunelima odvodi do hidroelektrane Gojak i time je voda Zagorske Mrežnice preusmjerena u sliv rijeke Dobre. Ispuštanjem manjih količina vode iz jezera Sabljaci (najčešće u vrijeme velikih voda), voda Zagorske Mrežnice povremeno protječe dijelom svog starog korita. Prateći staro korito Zagorske Mrežnice na dan uzorkovanja mjesto poniranja (314 m n. m.) bilo je u mjestu Otok Oštarijski (slika 5.7). Uzvodnije od točke poniranja bilo je vode u koritu ali vrlo niskog vodostaja i malih brzina tečenja.



Slika 5.7. Ponor Zagorske Mrežnice

Iz izvora **Bocino vrelo** (327,2 m n. m.) zahvaća se voda za javnu vodoopskrbu te je izvor ograđen, radi čega je uzorak uzet neposredno uz ogradu (slika 5.8). Pojava izvora Bocino vrelo, uvjetovana je kontaktom dobro propusnih malmskih vapnenaca u zaleđu izvora i slabije propusnih dogerskih dolomita.



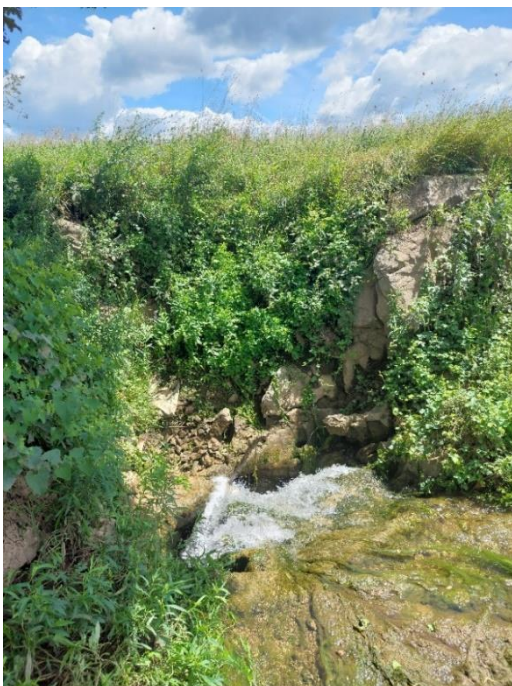
Slika 5.8. Izvor Bocino vrelo

Bocino vrelo formira manji površinski vodotok koji ponire nakon 2,5 km. Pronalazak **ponorne zone** potoka koji je formiran nizvodno od **Bocinog vrela** je bio malo zahtjevniji zbog nepristupačnosti terena. Uzorak je uzet neposredno prije završetka površinskog toka (326 m n. m.) koji je vidljiv na slici 5.9. Nije bila vidljiva jasna jedna točka poniranja.



Slika 5.9. Ponor Bocinog potoka

Ponor Munjave (319,9 m n. m.) nalazi se na kontaktu slabije propusnih jurskih i dobro propusnih krednih naslaga. Voda lako i brzo ponire u jednoj točki tj. u široku (vjerojatno vertikalnu) pukotinu. Na slici 5.10. jasno se vidi mjesto poniranja formirano u krednim naslagama.



Slika 5.10. Ponor Munjave

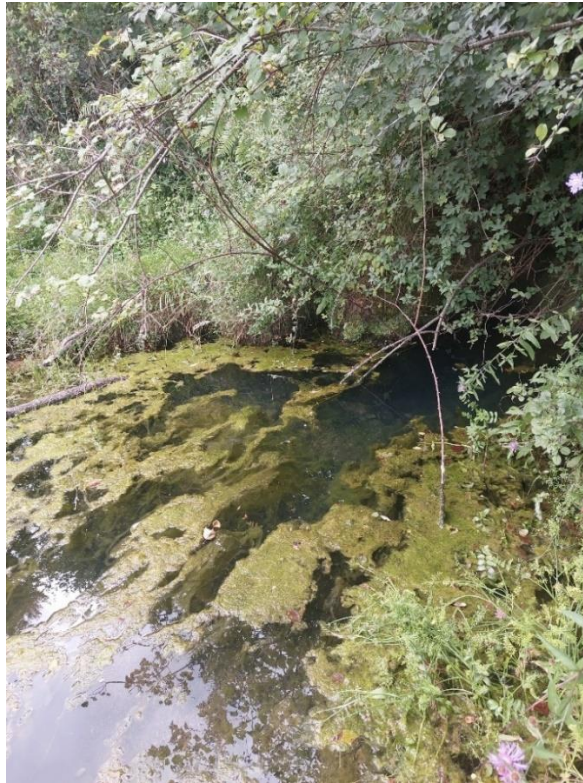
Do izvora **Bistrac** (216 m n. m.) pristupa se lokalnom cestom od Tounja prema zaselku Bistrac – nazvanom prema istoimenom izvoru. Postoji više točaka istjecanja, a glavna točka izviranja nalazi se ispod stijene što je prikazano na slici 5.11. Izvor Bistrac izvire iz foraminifersko – algalnih i prigrébenskih vapnenaca kredne starosti te predstavlja silazan tip izvora.



Slika 5.11. Izvor Bistrac

Do izvora **Globornice** (205,9 m n. m.) dolazi se iz naselja Gerovo Tounjsko. Spuštanjem po šumskom putu dolazi se do samog izvora. Na dan uzorkovanja istjecala je izrazito mala količina vode te je zbog veće količine mulja bilo teže prikupiti čisti uzorak vode. Voda izvire

podno brda u foraminifersko-algalnim i prigrébenskim vapnencima kredne starosti te nastavlja svoj tok po livadi. Izvor Globornice prikazan je na slikama 5.12. i 5.13.



Slika 5.12. Izvor Globornice



Slika 5.13. Nizvodni dio Globornice

Izvor rijeke Tounjčice (209 m n. m.) (slika 5.14) smješten je ispod zida željezničke pruge Karlovac – Oštarije. Rijeka izvire iz prostrane špilje, a izvor se javlja na kontaktu albskih foraminiferskih i aptskih prigrébenskih vapnenaca. Do većih količina istjecanja na

izvoru dolazi za vrijeme visokih voda kada se formira površinski tok Zagorske Mrežnice nizvodno od brane Sabljaci. Razlog tome je već prethodno spomenuto umjetno jezero Sabljaci koje je prekinulo tok rijeke Zagorske Mrežnice, a time je prekinuto i prihranjivanje izvora Tounjčice. Na dan uzorkovanja, izdašnost izvora bila je izrazito mala.



Slika 5.14. Izvor rijeke Tounjčice

Izvor Kukače (205 m n. m.) prikazan na slici 5.15 i 5.16 predstavlja najveću pritoku rijeke Tounjčice. Izvor je smješten u kanjonu na početku istoimenog naselja Kukača. Nalazi se na kontaktu albskih foraminiferskih i aptskih prigrebenskih vapnenaca. Na dan uzorkovanja izvor je bio male izdašnosti, ali se nizvodno formira veći tok koji Tounjčicu opskrbljuje s većom količinom vode.



Slika 5.15. Izvor Kukače



Slika 5.16. Tok Kukače

Rudnica (slika 5.17) je drugi pritok rijeke Tounjčice. Točan izvor Rudnice nije pronađen, već se voda polako skuplja te tako formira tok. Korito Rudnice od prvog pojavljivanja vode se proteže još 30-ak metara uzvodnije. Rudnica se već nakon 200 metara ulijeva u Tounjčicu. Uzorak je uzet na mjestu prvog pojavljivanja vode (200 m n. m.). Izvor se javlja u naslagama donjokrednih vapnenaca.



Slika 5.17. Izvor Rudnice

Do **mjesta ulijevanja Tounjčice u Mrežnicu** dolazi se županijskom cestom od Ogulina prema Slunju te makadamskim putem prema mjestu Ključ. Slijedeći makadamski put do kraja dolazi se do rijeke Tounjčice i Mrežnice. Na ovom mjestu uzeta su tri uzorka vode. Jedan je uzet na Tounjčici nekoliko metara prije ulijevanja u Mrežnicu (161 m n. m.) (slika 5.18). Drugi je uzet na Mrežnici nekoliko metara prije ulijevanja Tounjčice (166,7 m n. m.)

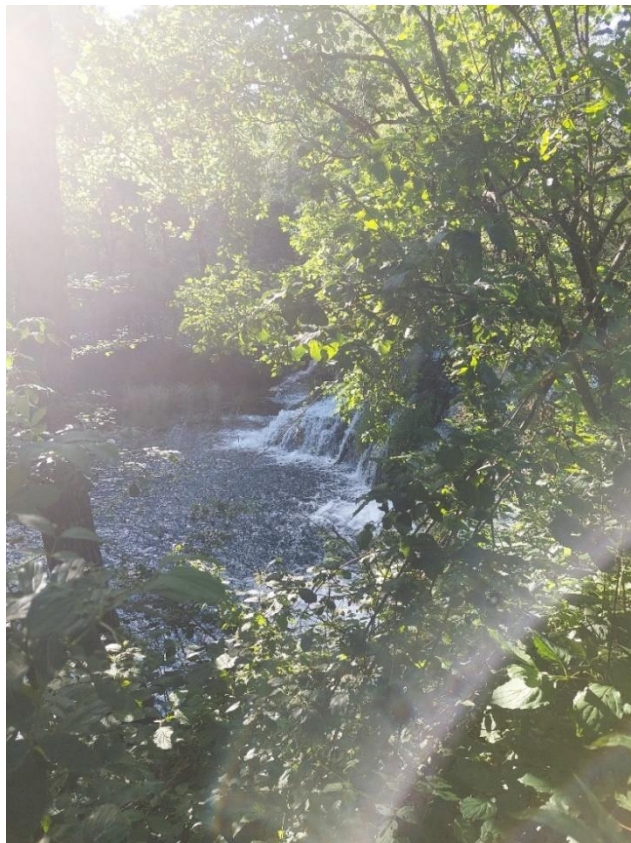
(slika 5.19), te je treći uzet na Mrežnici nekoliko metara nakon ulijevanja Tounjčice u Mrežnicu (162 m n. m.). Dvije spomenute rijeke spajaju se sedrenim slapovima (5.20) koje su karakteristične za rijeku Mrežnicu.



Slika 5.18. Mjesto uzorkovanja na Tounjčici prije ulijevanja u Mrežnicu



Slika 5.19. Mjesto uzorkovanja na Mrežnici prije ulijevanja Tounjčice



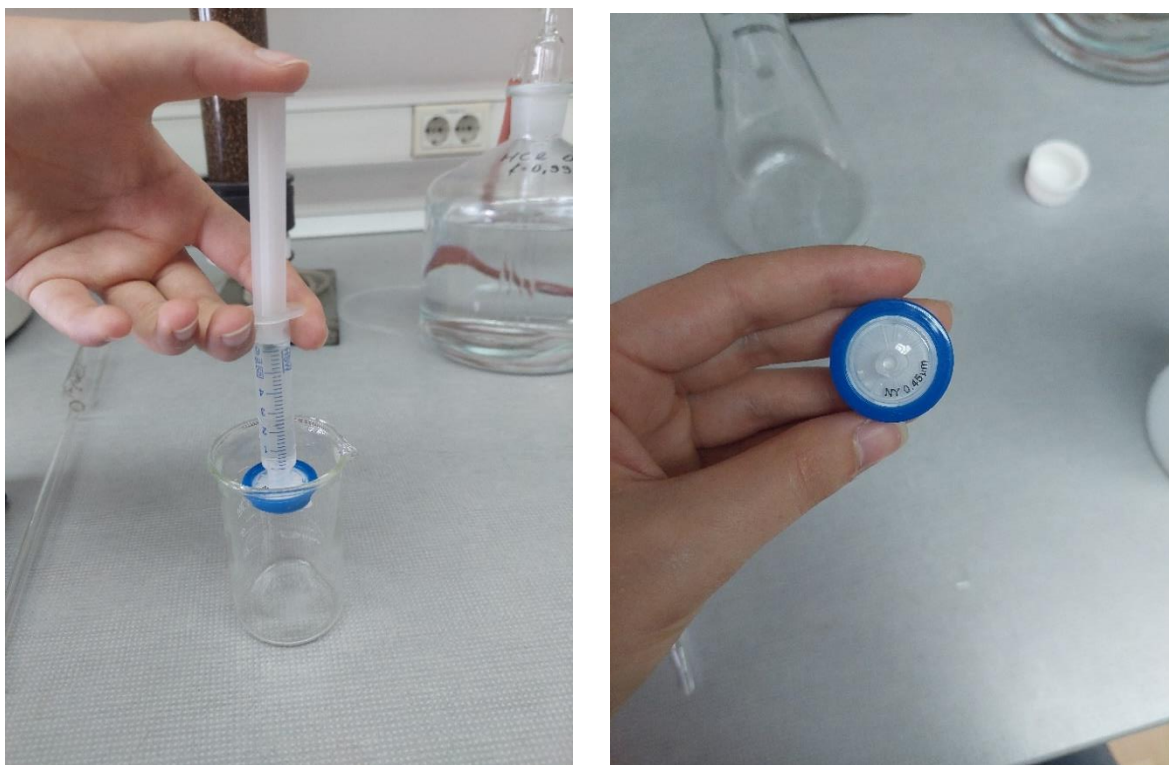
Slika 5.20. Slapovi na mjestu ulijevanja Tounjčice u Mrežnicu

5.2. Laboratorijsko istraživanje

Laboratorijska istraživanja provedena su u laboratoriju za analizu geoloških materijala na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Za laboratorijska ispitivanja korištene su metode ionske kromatografije te postupak titracije. Ispitivanja su provedena 4. i 10. srpnja 2024. godine. Prije ispitivanja proveden je postupak pripremanja uzoraka kao i potrebnog laboratorijskog posuđa i pribora.

5.2.1. Metoda ionske kromatografije

Ionska kromatografija je fizikalno-kemijska metoda separacije u kojoj se sastojci razdjeljuju između dviju faza od kojih je jedna nepokretna (stacionarna) dok se druga kreće u određenom smjeru (pokretna faza). Metodom ionske kromatografije određuje se sastav vode, odnosno ioni prisutni u vodenom uzorku. Uređaj se sastoji od anionske i kationske kolone te se jednim uređajem mjeri koncentracija aniona, a drugim uređajem se mjeri koncentracija kationa. Moguće je izmjeriti koncentracije sedam aniona (F^- , Cl^- , NO_2^- , Br^- , NO_3^- , PO_4^{3-} i SO_4^{2-}) i šest kationa (Li^+ , Na^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} , K^+ i Ca^{2+}). Prije provedbe samog postupka ionske kromatografije, uzorci vode su bili filtrirani pomoću filtra od $0,45\ \mu m$ (slika 5.21.), a uređaj je bio kalibriran pomoću standardne kalibracijske otopine.



Slika 5.21. Prikaz filtra i procesa filtriranja

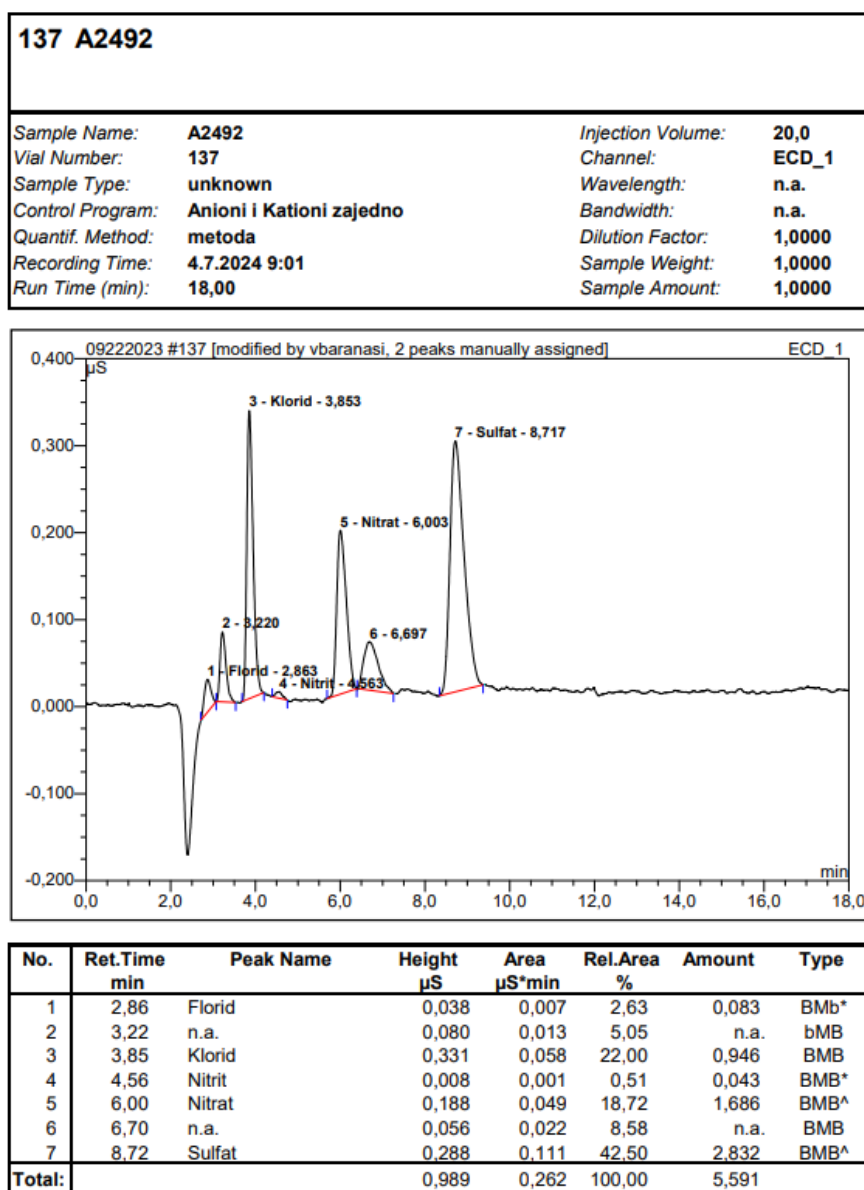
Za provedbu ionske kromatografije korišten je uređaj Dionex ICS-90 Ion Chromatography System. Sustav Dionex ICS-90 funkcionira na principu izokronične ionske analize koristeći detekciju potisnute vodljivosti (Dionex Corporation, 2006). Kromatograf se sastoji od sljedećih elemenata: mobilna faza, plin (He) i samog uređaja. Uređaj je prikazan na slici 5.22.



Slika 5.22. Ionski kromatograf

Nakon upisivanja mjerenja u novu sekvencu, može se injektirati uzorak u uređaj. To se provodi na način da se u dvije šprice od 1 ml uzme filtrirani uzorak vode te se istovremeno injektira u kationsku i anionsku kolonu te je potrebno provesti barem dva injektiranja kako bi se kolona isprala od prethodnih ispitivanja. Zatim, pumpa tjera eluat i uzorak kroz kolonu te dolazi do separacije iona. Odvajanje se radi pomoću procesa ionske izmjene i bazira se na tome da pojedini ioni iz uzorka prolaze kroz kolonu različitim brzinama. Ioni koji brže prođu imaju kraće vrijeme zadržavanja. Te brzine ovise o interakcijama iona s mjestima gdje dolazi do ionske izmjene. Nakon što prođu kroz kolonu, prolaze kroz supresor koji pojačava detekciju iona uzorka te potiskuje vodljivost eluata. Stanica za vodljivost mjeri električnu vodljivost iona kako oni izlaze iz supresora te proizvode signale na temelju kemijskog ili fizikalnog svojstva uzorka i prosljeđuje signal na računalo. Sami postupak traje 18 minuta. Na kraju se odrađuje analiza podataka pomoću računala. Koristi se programska platforma Chromeleon. Program analizira podatke mjerenja uspoređujući pikove s kromatograma

dobivenih mjerenjima na uzorku i na standardnoj otopini. Rezultati se prikazuju pomoću kromatograma, a koncentracije su prikazane u tablici. Primjer kromatograma prikazan je na slici 5.23.



Slika 5.23. Primjer kromatograma

5.2.2. Metoda titracije

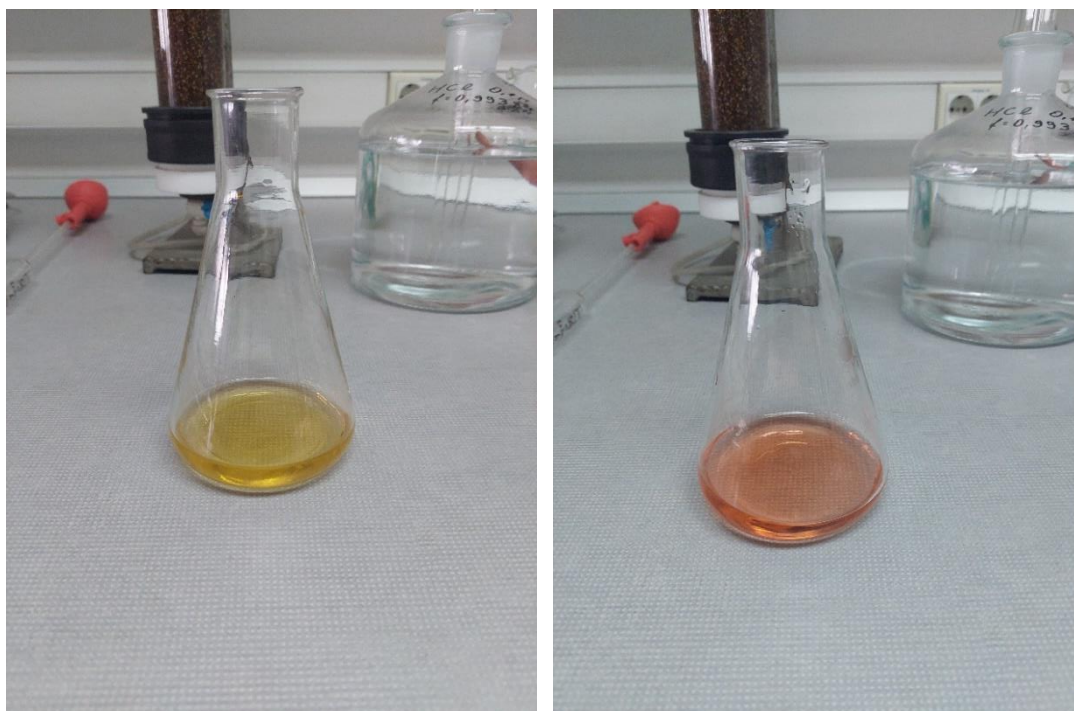
Ionskom kromatografijom nije moguće dobiti udio hidrogenkarbonatnog iona u uzorcima vode te je zbog toga bilo potrebno provesti postupak titracije. Metoda titracije je volumetrijska metoda te se njome određuje količina otopljene tvari mjerenjem volumena dodanog reagensa. Otopljena tvar reagira s otopinom reagensa poznate koncentracije sve do završetka reakcije. Završetak reakcije označava točka ekvivalencije odnosno stehiometrijska

točka. Kod stehiometrijske točke količina dodanog reagensa jednaka je količini analizirane tvari. Kraj titracije vidljiv je u promjeni boje dodanog indikatora.

Metoda se provodi na način da se pipetom uzima 100 ml uzorka koji se izlije u Erlenmeyerovu tikvicu. Zatim se uzima 5-6 kapi indikatora metiloranža koji se dodaje u Erlenmeyerovu tikvicu u kojoj se nalazi 100 ml uzorka vode. Dodavanjem metiloranža, uzorak poprima žutu boju. Bireta u kojoj se nalazi otopina klorovodične kiseline koncentracije 0,1 mol/l se napuni do oznake 0 ml. U Erlenmeyerovu tikvicu se polako iz birete dodaje klorovodična kiselina sve dok otopina u Erlenmeyerovoj tikvici ne promijeni boju. Kada otopina promijeni boju – iz žute pređe u narančastu (Slika 5.25), tada je postupak titracije završen. S birete se očitava volumen klorovodične kiseline koji je bio potreban da bi došlo do promjene boje otopine. Zatim se očitani volumen koristi u daljnjim izračunima.



Slika 5.24. Aparatura za titraciju



Slika 5.25. Promjena boje nakon titracije

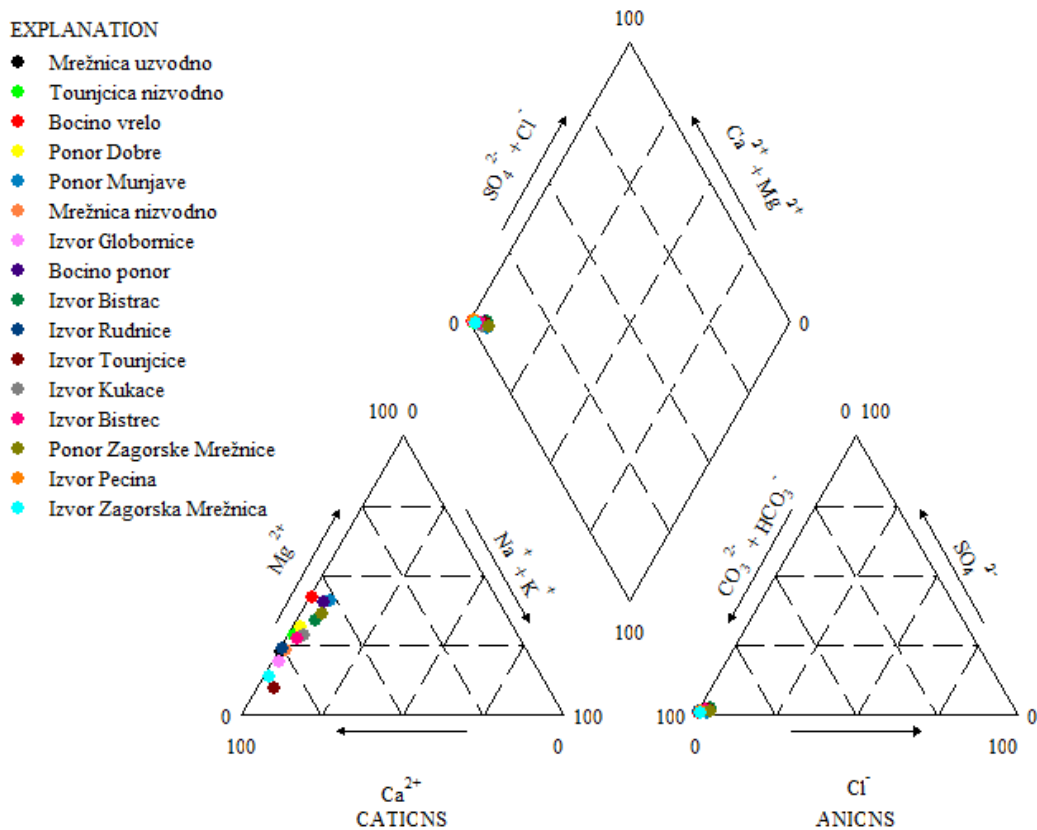
5.3. Hidrogeokemijske značajke

U tablici 5.1. prikazane su koncentracije aniona i kationa dobivenih ionskom kromatografijom i titracijom za sve uzorke te je izračunat ionski balans. Ionski balans provodi se kako bi se provjerila točnost provedene kemijske analize. Prihvatljiva razlika između aniona i kationa je $\pm 10\%$. Iz tablice je vidljivo da kemijska analiza s uzorcima vode iz izvora Zagorske Mrežnice te izvora Pećina odstupaju više od dopuštenog (podaci označeni crvenom bojom) te se smatraju manje pouzdanima.

Tablica 5.1. Koncentracije aniona i kationa te ionski balans

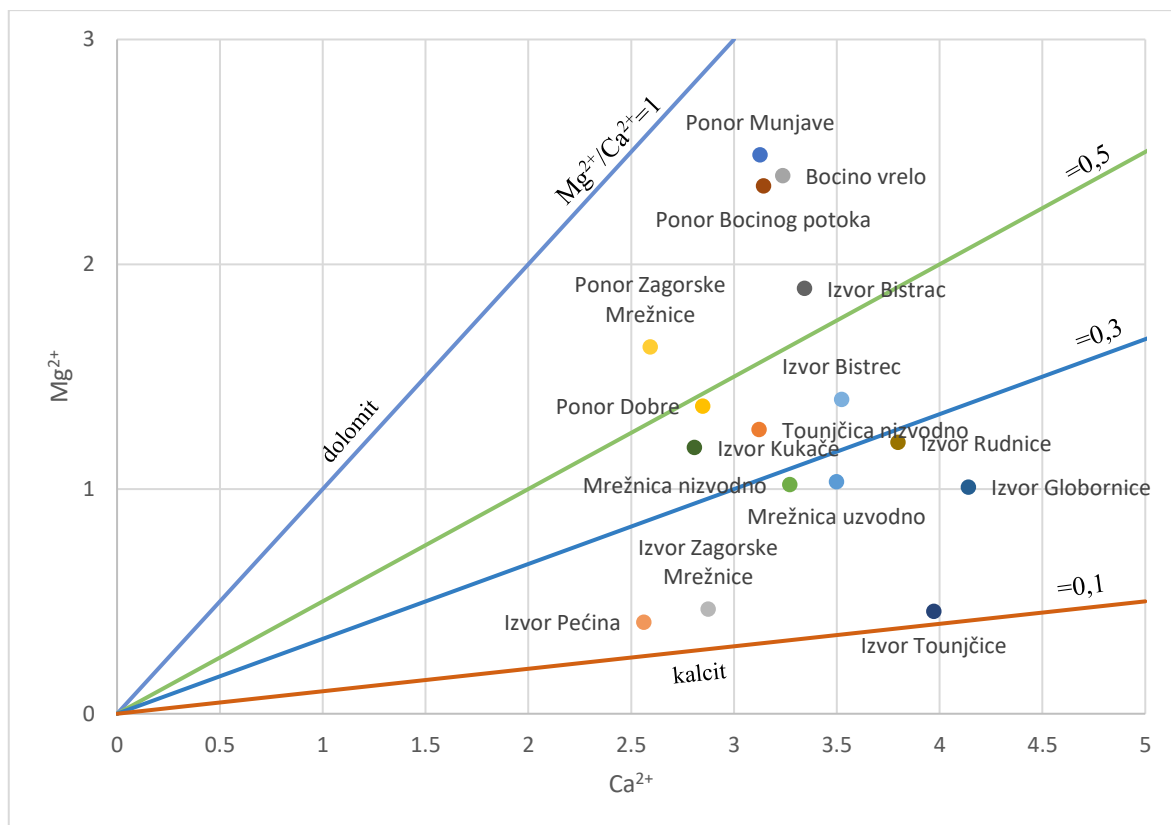
	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Ionski balans
	mg/l											%
Ponor Dobre	0,10	2,12	0,0	1,78	3,05	266,8	2,37	0,05	16,63	0,66	57,08	-1,19
Ponor Z. Mrežnice	0,12	7,72	0,0	0,20	2,70	291,1	6,87	0,0	19,83	1,19	51,95	-5,22
Izvor Bistrec	0,28	3,61	0,0	3,23	4,28	309,3	3,73	0,0	17,00	1,30	70,60	-2,00
Izvor Z. Mrežnica	0,04	1,82	0,0	2,51	2,08	303,2	1,44	0,0	5,66	0,32	57,60	-19,97
Izvor Pećina	0,11	2,05	0,0	2,21	2,09	285,0	1,16	0,03	4,94	0,34	51,32	-22,77
Bocino vrelo	0,10	1,10	0,0	1,76	2,22	351,7	1,28	0,04	29,10	0,52	64,87	-1,49
Ponor Bocino	0,20	7,49	0,05	2,87	4,60	339,6	7,25	0,0	28,55	0,00	62,98	-1,05
Ponor Munjave	0,10	7,62	0,0	2,31	2,56	351,7	9,52	0,0	30,22	1,05	62,67	-0,16
Izvor Bistrac	0,07	6,87	0,0	5,25	6,39	321,4	7,11	0,0	22,99	0,81	67,00	-1,05
Izvor Globornice	0,13	1,38	0,0	2,84	2,89	309,3	1,78	0,03	12,25	1,03	82,96	0,32
Izvor Tounjčice	0,14	4,85	0,0	11,93	4,16	266,8	5,04	0,0	5,53	1,27	79,57	-1,26
Izvor Kukače	0,09	3,98	0,0	2,42	2,39	272,9	4,07	0,05	14,40	1,75	56,27	-5,18
Izvor Rudnice	0,11	0,96	0,0	2,33	3,00	333,5	1,07	0,03	14,67	0,56	76,10	-4,99
Tounjčica nizvodno	0,14	1,57	0,03	1,31	2,78	291,1	1,67	0,05	15,37	0,73	62,57	-4,48
Mrežnica uzvodno	0,08	0,95	0,04	1,69	2,83	285,0	0,94	0,03	12,52	0,51	70,11	-2,18
Mrežnica nizvodno	0,11	1,22	0,0	1,58	2,68	266,8	1,45	0,03	12,40	0,72	65,55	-1,36

Podaci o koncentracijama aniona i kationa za sve uzorke ucrtani su na Piperov dijagram (slika 5.26). Piperov dijagram služi za određivanje hidrogeokemijskog facijesa i određen je u programu GW_Chart (USGS,2000). Sastoji se od dva trokuta. U lijevom trokutu prikazani su postotni udjeli ekvivalenata najvažnijih kationa (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), a u desnom se nalaze postotni udjeli ekvivalenata najvažnijih aniona (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-}). Između spomenuta dva trokuta nalazi se romb koji na suprotnim stranicama ima sume postotnih udjela ekvivalenata grupa kationa i aniona. Facijes vode određuje se preko dvije točke, jedna točka u trokutu kationa i jedna točka u trokutu aniona, a za interpretaciju je u radu korištena klasifikacija prema Freeze i Cherry (1979). U skladu s navedenom klasifikacijom izdvojena su dva tipa facijesa. Kalcijско hydrogenkarbonatnom tipu voda pripadaju uzorci uzeti s izvora Tounjčice, izvora Zagorske Mrežnice, izvora Globornice, izvora Pećine te uzorci s Mrežnice prije i nakon ulijeivanja Tounjčice. Kalcijско – magnezijско hydrogenkarbonatnom tipu pripadaju ostali uzorci, a to su uzorci s izvora Kukače, izvora Rudnice, uzorak rijeke Tounjčice prije utoka u Mrežnicu, s ponora Dobre, izvora Bistrec, ponora Zagorske Mrežnice, izvora Bistrac, ponora Munjave te Bocinog vrela i ponora.

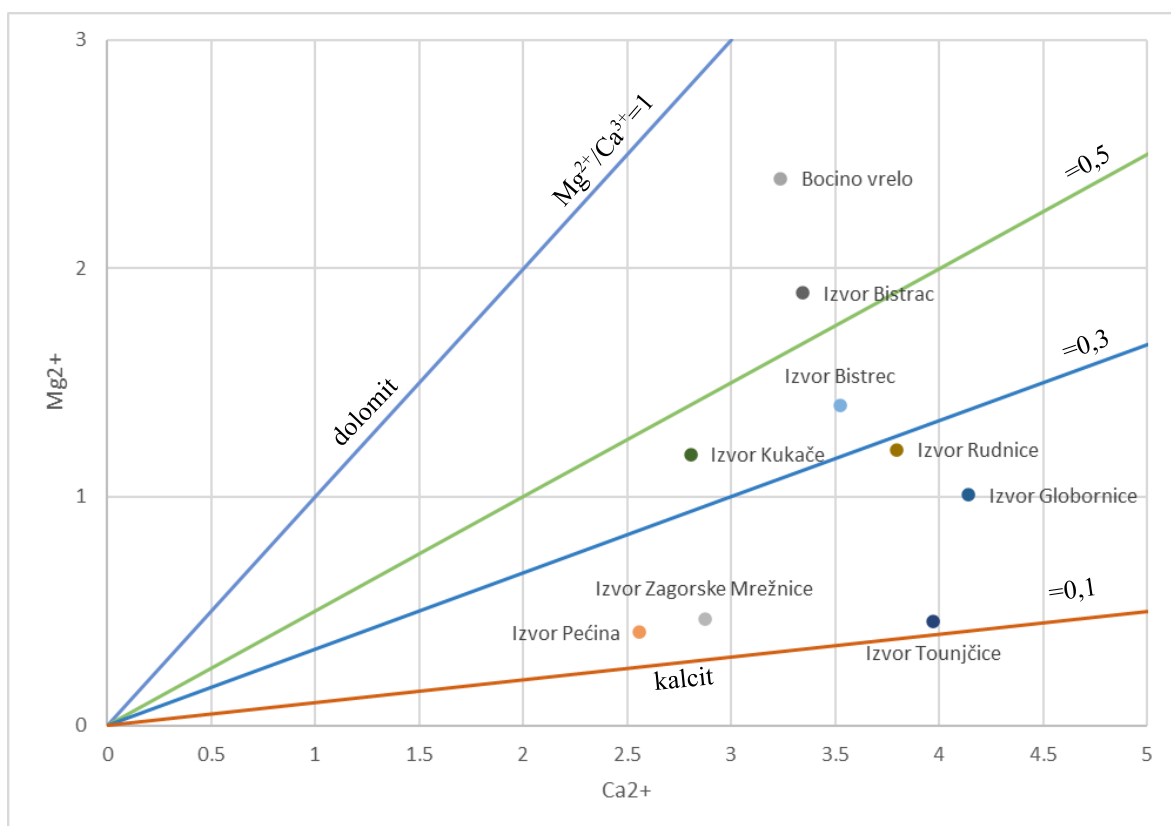


Slika 5.26. Piperov dijagram

Piperovim dijagramom dobiven je hidrogeokemijski facijes uzoraka, ali za detaljnije određivanje podrijetla uzorkovane vode korišten je Mg^{2+}/Ca^{2+} omjer (meq/l) (slika 5.27). Mg^{2+}/Ca^{2+} omjer daje uvid u vrstu karbonatnih stijena s kojima je voda bila u kontaktu. Otapanje čistog kalcita rezultira vodom koju karakterizira Mg^{2+}/Ca^{2+} omjer ispod 0,1. Međutim, istovremeno otapanje kalcita i dolomita rezultira omjerom Mg^{2+}/Ca^{2+} od oko 0,33. Ako je omjer Mg^{2+}/Ca^{2+} jednak 1, to znači da je u vodi prisutno čisto otapanje dolomita (Szramek, K. i dr., 2011). Na slici 5.28 prikazani su omjeri Mg^{2+}/Ca^{2+} samo u uzorcima izvorske vode. Iz grafa je vidljivo da voda na izvor Tounjčice, Zagorske Mrežnice i Pećine dolazi iz kalcijске sredine, odnosno da dolazi do dominantnog otapanja vapnenačkih stijena. Na vodama izvora Bistrec, Kukača, Rudnica i Globornica dominantnija je koncentracija kalcija, ali je prisutan i magneziji. Obzirom na to, voda na tim izvorima potječe iz kalcijsko – dolomitne sredine. Za uzorke voda Bocinog vrela i izvora Bistrac porast omjera Mg^{2+}/Ca^{2+} je bitno izraženiji. To se može pripisati većem udjelu dolomita u njihovom slivnom području ili produljenom vremenu zadržavanja vode unutar malih pukotina vodonosnika. Omjeri u vodama izvora Zagorske Mrežnice i izvora Pećina samo su prikazani za usporedbu, ali ne uzimaju se u obzir zbog loše ionske ravnoteže provedenih kemijskih analiza. Boljat i dr. (2024b) su u svom radu dali hidrogeokemijsku interpretaciju izvora Zagorske Mrežnice i Tounjčice te su utvrdili da je omjer bio veći u razdobljima recesije, a niži u uvjetima visokih voda. Također su utvrdili i da vode s izvora Tounjčice, a i Zagorske Mrežnice, ukazuju na otapanje vapnenačkih stijena.



Slika 5.27. Mg^{2+}/Ca^{2+} omjer u svim uzorcima vode



Slika 5.28. Mg^{2+}/Ca^{2+} omjer za izvorske vode

6. RASPRAVA

Istraživano područje obuhvaća šire zaleđe izvora Tounjčice, pri čemu su uzorci prikupljeni na 16 različitih lokacija, uključujući ponore, izvore i površinske vode. Mjesta uzorkovanja mogu se grupirati u nekoliko zona. Prvu zonu čini izvorišna zona Zagorske Mrežnice, Munjave te Bocinog potoka, dok druga zona obuhvaća njihove ponore i ponor rijeke Dobre. Treća i četvrta zona sastoje se od reliktnih ponorskih dolina u kojima nema površinskih tokova i dolazi do difuzne infiltracije oborina. Peta zona je ključna jer se nalazi na kontaktu između središnjeg višeg dijela i niže zaravni, gdje su smješteni izvori Tounjčice i Kukače, koji se nalaze na rasjednoj zoni Tounjskog rasjeda. Šesta zona predstavlja fluviokrške doline, uključujući aktivne kanjonske doline Tounjčice, Kukače, Rudnice i Mrežnice. Kemijskom analizom prikupljenih uzoraka i određivanjem sadržaja osnovnih iona određen je hidrogeokemijski facijes voda te je dobiven uvid u različite hidrogeokemijske procese unutar pojedinih zona uz pomoć Mg^{2+}/Ca^{2+} omjera. Piperov dijagram pokazuje jasne hidrogeokemijske razlike između pojedinih izvora, gdje vode s izvora Tounjčice, Globornice, te uzorci rijeke Mrežnice pripadaju kalcijsko - hidrogenkarbonatnom tipu facijesa, dok vode s izvora Kukače, Rudnice, izvora Bistrec, Bistrac i Bocinog vrela te ponora Zagorske Mrežnice, Dobre, Munjave i ponora Bocinog potoka pokazuju veću prisutnost magnezija, što ih svrstava u kalcijsko-magnezijsko-hidrogenkarbonatni tip facijesa. Razlike u Mg^{2+}/Ca^{2+} omjerima otkrivaju da vode s ponora Zagorske Mrežnice pokazuju viši udio magnezija u odnosu na izvor Tounjčice, sugerirajući veće otapanje dolomita u ponorskoj zoni. Nasuprot tome, voda iz izvora Tounjčice pokazuje veći udio kalcija, što upućuje na dominantno otapanje vapnenca. Na temelju tih podataka može se pretpostaviti da u sušnim razdobljima dolazi do duljeg zadržavanja vode u vodonosniku i zbog otapanja vapnenca promjene kemizma vode koja ponire. Za razliku od izvora Tounjčice, izvori Kukače i Rudnice pokazuju sličniji sastav vodi koja ponire i potencijalnu bolju vezu s ponornom zonom odnosno kraće zadržavanje vode u podzemlju. Vode s ponora Dobre, čiji je sastav posljedica podjednakog otapanja kalcita i dolomita, pokazuju sličnosti s vodama izvora Bistrac, što sugerira da ove vode podzemnim putevima dolaze nepromijenjene do tog izvora. Činjenica da voda s izvora Tounjčice ima značajno niži Mg^{2+}/Ca^{2+} omjer od voda iz ponora Dobre i Zagorske Mrežnice upućuje na mogućnost postojanja zasebnog podzemnog sustava, vezanog uz vodonosnike bogate vapnencom. Odnosno vodonosnike koji se nalaze dominantno u vapnenačkim naslagama. Kompleksnost sustava podzemnih veza između ponora i izvora na ovom području zahtijeva daljnja

istraživanja kako bi se precizno odredili podzemni putevi i njihova povezanost s različitim zonama poniranja.

7. ZAKLJUČAK

Klimatske promjene, kao što je povećanje prosječnih godišnjih temperatura i nepravilno raspoređene količine oborina, imaju značajan utjecaj na hidrološki sustav. Da do klimatskih promjena dolazi ukazuje nam povećanje prosječnih godišnjih temperatura za razdoblje od 2014. do 2022. godine, koje iznosi $12,7^{\circ}\text{C}$ u usporedbi s $10,3^{\circ}\text{C}$ za razdoblje od 1949. do 2022. godine. Povećanje sušnih razdoblja i nepravilnosti u distribuciji oborina, zajedno s ekstremnim oborinskim događajima, uzrokuje poplave koje mogu prouzročiti štetu ljudima, infrastrukturi i okolišu. Ovi ekstremni događaji dodatno će opteretiti vodne resurse ovog područja, čineći dugoročna istraživanja i planiranja održivog upravljanja vodama nužnim.

Provedena hidrološka analiza, temeljena na podacima o protoku s postaja Juzbašić i Mrzlo Polje, omogućila je izračun protoka Tounjčice. Dobiveni su podaci da minimalni protok Tounjčice iznosi $0,06\text{ m}^3/\text{s}$, srednji protok iznosi $13,1\text{ m}^3/\text{s}$ te maksimalni protok iznosi $175\text{ m}^3/\text{s}$. Također, hidrološka analiza provedena za istraživano područje ukazuje na značajan utjecaj ljudskih aktivnosti, poput preusmjerenja toka Zagorske Mrežnice zbog hidroelektrične proizvodnje, što izravno utječe na izdašnost izvora Tounjčice, osobito tijekom sušnih razdoblja. Ova promjena, zajedno s duljim sušnim razdobljima zabilježenim u klimatskoj analizi, upućuje na potrebu za daljnjim istraživanjima kako bi se procijenili dugoročni utjecaji na izvor i protok Tounjčice.

Recesijskom analizom su izrađene glavne recesijske krivulje, višedijelne glavne recesijske krivulje i krivulje trajanja na vremenskim nizovima protoka izmjerenih na hidrološkim postajama i na vremenskom nizu izračunatih protoka rijeke Tounjčice. Dobiveno je da se za sve analizirane vremenske nizove može izraditi jedna glavna recesijska krivulja uz pripadajuće visoke koeficijente determinacije. To nam ukazuje da postoji konzistentan obrazac opadanja protoka vode nakon prestanka dotoka, što omogućuje dobro uklapanje podataka u matematički model. Također, uočeno je da izvor Zagorske Mrežnice nema zabilježenih većih izdašnosti od $45\text{ m}^3/\text{s}$ uz dugo zadržavanje velikih voda. Obzirom da je to netipično za krške izvore, može se zaključiti da je istjecanje velikih voda limitirano kapacitetom pukotina.

Analizom prikupljenih podataka na 16 lokacija, primarno pomoću ionske kromatografije i titracije, pružen je uvid u hidrogeokemijske značajke izvora Tounjčice i šireg područja. Utvrđeno je da vode u širem području izvora Tounjčice pripadaju kalcijском i kalcijско – magnezijско hidrogenkarbonatnom tipu, što je karakteristično za krške izvore u kojima dolazi do intenzivnog otapanja vapnenca. Varijacije u koncentraciji iona, s naglašenim

promjenama omjera Mg^{2+}/Ca^{2+} tijekom razdoblja niskih voda kada je istraživanje provedeno, ukazuje na složenost hidrogeokemijskih procesa unutar krškog sustava. Dulje zadržavanje vode u podzemlju ukazuje na dinamične odnose između različitih geoloških formacija u zoni izvora.

Zaključno, rezultati ovog istraživanja pružaju doprinos razumijevanju hidrogeokemijskih i hidroloških procesa u krškom sustavu izvora Tounjčice. Istraživanje je jasno pokazalo značaj interakcije vode i stijene, sezonske varijacije protoka te utjecaj klimatskih promjena i ljudskih intervencija.

8. LITERATURA

BAHUN, S. (1970): Geološka osnova krške zavale Ogulin – Plaški, Krš Jugoslavije 7(1), 1-20

BOČIĆ, N., PAHERNIK, M., BOGNAR, A. (2010): Geomorfološke značajke Slunjske zaravni, Hrvatski geografski glasnik 72, 5-26

BOČIĆ, N., PAHERNIK, M., MIHEVC, A. (2015): Geomorphological significance of the palaeodrainage network on a karst plateau: The Una-Korana plateau, Dinaric karst, Croatia, Geomorphology 247, 55-65

BOČIĆ, N., CVITANOVIĆ, H., BASARA, D. (2016): Osnovna speleološka obilježja Karlovačke županije, Prirodoslovlje 16 (1-2), 267-290

BOČIĆ, N. (2020): Geomorfologija krša na području Oštarije – Tounj i njezin značaj u geomorfološkoj evoluciji šireg područja

BOLJAT, I., TERZIĆ, J., DUIĆ, Ž., LUKAČ REBERSKI, J., SELAK, A., (2024a): Conceptual Model Based on Groundwater Dynamics in the Northern Croatian Dinaric Region at the Transition from the Deep Karst and Fluviokarst

BOLJAT, I., TERZIĆ, J., DUIĆ, Ž., LUKAČ REBERSKI, J., SELAK, A., BRIŠKI, M. (2024b): Tracing hydrological processes: insights from hydrochemical and isotopic investigations in the northern part of Croatian Dinaric karst

DHMZ (2011): Klimatski atlas Hrvatske, 20. str.

DHMZ (2014): Klimatski atlas Hrvatske, 20. str.

DIONEX CORPORATION (2006): ICS-90 Ion Chromatography System Operator's Manual, Dionex Corporation, Printed in United States of America.

FILIPČIĆ, A. (2003): Köppenova podjela klima i hrvatsko nazivlje, *Geoadria*, Vol. 8/1, 17-37

FREEZE, R. A., CHERRY, J.A. (1979): *Groundwater*, Prentice Hall Inc., Englawood Cliffs, 238-254

GAMS, I. (1986): Kontaktni fluviokras, *Acta Carsologica* 14/15, 71-88

GAMS, I. (2001): Notion and forms of contact karst, *Acta Carsologica*, 30 (2), 33-46

GUNN, J. (2006): Fluviokarst, in: Gunn, J. (ed): *Encyclopedia of caves and karst science*, Taylor and Francis, London, 751-753

MIHEVC, A. (1991): Morfološke značilnosti ponornega kontaktnega krasa v Sloveniji, *Geografski vestnik* 63, 41-50

JU NATURA VIVA (2021): Plan upravljanja področjem ekološke mreže Mrežnica – Toujčica (PU 6051), Karlovac

PAHERNIK, M. (2012): Prostorna gustoća ponikava na području Republike Hrvatske, *Hrvatski geografski glasnik* 74 (2), 5-26

POSAVEC, K., PARLOV, J., NAKIĆ, Z. (2010): Fully Automated Objective-Based Method for Master Recession Curve Separation. *Ground Water* 48, no. 4:598-603.

POSAVEC, K., GIACOPETTI, M., MATERAZZI, M., BIRK, S. (2017): Method and Excel VBA Algorithm for Modeling Master Recession Curve Using Trigonometry Approach. *Ground Water* 55, no. 6: 891-898

SZRAMEK, K., WALTER, L. M., KANDUČ, T., OGRINC, N. (2011): Dolomite Versus Calcite Weathering in Hydrogeochemically Diverse Watersheds Established on Bedded Carbonates (Sava and Soča Rivers, Slovenia)

U.S. GEOLOGICAL SURVEY (2000): *GroundWater Chart*, USGS

VELIĆ, I., SOKAČ, B. (1981): Osnovna geološka karta 1:1000000, list Ogulin, SGZ Beograd i GZ Zagreb

ZANINOVIĆ, K., GAJIĆ-ČAPKA, M., PERČEC TADIĆ, M. i dr., 2011: Klimatski atlas Hrvatske 1961-1990., 1971-2000., Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb

ZANINOVIĆ, K., GAJIĆ-ČAPKA, M., PERČEC TADIĆ, M. i dr., 2014: Klimatski atlas Hrvatske 1961-1990., 1971-2000., Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb

Zakoni i pravilnici

NARODNE NOVINE br. 127/19. Strategija prilagodbe klimatskim promjenama u republici hrvatskoj za razdoblje do 2040. godine s pogledom na 2070. godinu. Zagreb: Narodne novine d.d.

Web izvori

DGU (2011): Hrvatska osnovna karta – HOK 1:25 000. Geoportal DGU, URL: <http://geoportal.dgu.hr> (21.9.2024.)

DGU (2011): Topografska karta (TK25). Mjerilo 1: 25000, Geoportal DGU, URL: <http://geoportal.dgu.hr> (17.9.2024.)

HAOP (2012): CORINE Land Cover, URL: <https://www.haop.hr/hr/baze-i-portali/pokrov-i-namjena-koristenja-zemljista-corine-land-cover> (9.9.2024.)