

Kroskorelacijska analiza hidrograma izvora u golom kršu Hrvatske - izvor rijeke Rude

Tadić, Jakov

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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:169:176436>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-03**



Repository / Repozitorij:

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



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

**KROSKORELACIJSKA ANALIZA HIDROGRAMA IZVORA
U GOLOM KRŠU HRVATSKE – IZVOR RIJEKE RUDE**

Diplomski rad

Jakov Tadić

GI 337

Zagreb, 2019.

Zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Krešimiru Pavliču na pomoći prilikom izrade ovog rada. Veliko hvala mojoj obitelji, a posebno roditeljima koji su mi bili snažna podrška i vjetar u leđa tijekom studiranja. Hvala svim prijateljima jer su mi studentske dane učinili nezaboravnim dijelom života te hvala Hrvatskoj domovini kojoj ću stečenim znanjem bespogovorno služiti i neumorno ju graditi!

Hvala Bogu!

KROSKORELACIJSKA ANALIZA HIDROGRAMA IZVORA
U GOLOM KRŠU HRVATSKE – IZVOR RIJEKE RUDE
JAKOV TADIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni-fakultet

Zavod za Matematiku, informatiku i nacrtnu geometriju

Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

U ovom diplomskom radu provodilo se hidrogeološko istraživanje izvora rijeke Rude. Napravljena je dnevna, mjesečna i godišnja analiza podataka protoka hidroloških stanica Ruda 1 i Ribnjak te oborina kišomjernih stanica Gljev, Ruda-Rosandići i Udovičić. Statističkim metodama korelacije, autokorelacije i kroskorelacije obrađeni su podaci oborina i protoka za razdoblje od pet hidroloških godina tj. od 2012. do 2016. godine. Podaci su obrađivani u programu Microsoft Excel korištenjem funkcije za korelaciju te korištenjem namjenskog VBA računalnog programa za kroskorelaciju.

Ključne riječi: krš, protok, oborine, Ruda, izvor, korelacija, autokorelacija, kroskorelacija

Diplomski rad sadrži: 47 stranica, 23 slike, 5 tablica i 11 referenci

Jezik izvornika: Hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Mentor: Doc. dr. sc. Krešimir Pavlić, RGNF

Povjerenstvo: 1. Doc. dr. sc. Krešimir Pavlić
2. Doc. dr. sc. Zoran Kovač
3. Doc. dr. sc. Marko Cvetković

Datum obrane: 18. srpnja 2019., Rudarsko-geološko-naftni fakultet

CROSS-CORRELATION ANALYSIS OF HYDROGRAPH SPRING IN
NAKED KARST OF CROATIA – RIVER RUDA SPRING

JAKOV TADIĆ

Thesis completed in: University of Zagreb

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Department of Mathematics, informatics and descriptive geometry

Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Abstract

In this Master's thesis, a hydrogeological study was conducted for the river Ruda spring. The hydrological analysis contains the analysis of daily, monthly and yearly discharge amounts of the hydrological stations Ruda and Ribnjak 1, and also precipitation from three hydrological stations Gljev, Ruda-Rosandići and Udovičić. Statistical correlation, auto-correlation and cross-correlation methods were used to calculate precipitation and discharge data for a period of five hydrological years (from 2012 to 2016). The data was processed in Microsoft Excel by using the correlation function and dedicated VBA computing program.

Keywords: karst, discharge, precipitation, Ruda, spring, correlation, auto-correlation cross-correlation

Thesis contains: 47 pages, 23 figures, 5 tables and 11 references

Original in: Croatian

Thesis deposited at: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Assistant professor Krešimir Pavlić, PhD

Reviewers: 1. Assistant professor Krešimir Pavlić, PhD
2. Assistant professor Zoran Kovač, PhD
3. Assistant professor Marko Cvetković, PhD

Date of defense: 18th of July, 2019, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Sadržaj

1. Uvod	1
2. O kršu općenito.....	2
3. Značajke istraživanog terena	6
3.1. Geološke značajke	6
3.2. Hidrogeološke značajke	7
3.3. Klimatološke značajke	11
4. Teorijska podloga i korišteni podaci	12
4.1. Korelacijska analiza.....	12
4.2. Autokorelacijska analiza.....	15
4.3. Kroskorelacijska analiza	17
4.4. Kišomjerne i hidrološke stanice.....	19
5. Rezultati.....	29
5.1. Rezultati obrade podataka korelacijom	29
5.2. Rezultati obrade podataka autokorelacijskom analizom	31
5.3. Rezultati obrade podataka kroskorelacijskom analizom	35
6. Zaključak	39
7. Literatura	40

Popis slika

Slika 2.1. Dinarski krš (Banović, 2014)	3
Slika 2.2. Izvor rijeke Rude	4
Slika 2.3. Najčešći tipovi krških izvora (Preuzeto s http://springstewardshipinstitute.org/) (A – vodonosnik, I – nepropusni materijal, S – izvor)	5
Slika 3.1. Hidrogeološka karta sliva (Banović, 2014.).....	9
Slika 3.2. Karta utvrđenih podzemnih veza krških voda sliva Cetine (Banović, 2014.).....	10
Slika 4.1. Vrste korelacije.....	12
Slika 4.2. Lokacije korištenih kišomjernih stanica.....	19
Slika 4.3. Lokacije hidroloških stanica na rijeci Rudi	20
Slika 4.4. Hidrološka stanica Ruda 1	21
Slika 4.5. Hidrološka stanica Ribnjak	21
Slika 4.6. Hidrogram	22
Slika 4.7. Hod godišnjih oborina na postaji Udovičić za razdoblje od 1991. do 2018. godine.	24
Slika 4.8. Hod godišnjih oborina na postaji Gljev za razdoblje od 2017. do 2018. godine.	25
Slika 4.9. Hod godišnjih oborina na postaji Ruda-Rosandići za razdoblje od 1998. do 2018. godine.	26
Slika 4.10. Srednji dnevni hod oborina stanica Udovičić, Gljev i Ruda-Rosandići za razdoblje od 2012. do 2016. godine.	27
Slika 4.11. Minimalni, maksimalni i srednji mjesečni protoci rijeke Rude za razdoblje od 2012. do 2016. godine.	28
Slika 4.12. Dnevni hidrogram rijeke Rude za razdoblje od 2012. do 2016. godine.....	28
Slika 5.1. Korelacija dnevnih protoka i srednjih dnevnih količina oborina na kišomjernim stanicama Udovičić, Ruda-Rosandić i Gljev za razdoblje od 2012. do 2016. godine.....	29
Slika 5.2. Korelacija mjesečnih protoka i srednjih mjesečnih količina oborina na kišomjernim stanicama Udovičić, Ruda-Rosandić i Gljev za razdoblje od 2012. do 2016. godine.	30
Slika 5.3. Korelacija godišnjih protoka i srednjih godišnjih količina oborina na kišomjernim stanicama Udovičić, Ruda-Rosandić i Gljev za razdoblje od 2012. do 2016. godine.	30
Slika 5.4. Autokorelogram dnevnih mjerenja izdašnosti izvora rijeke Rude mjerenih na postajama Ruda 1 i Ribnjak.....	32

Slika 5.5. Kroskorelogram dnevnih mjerenja izdašnosti izvora rijeke Rude mjerenih na postajama Ruda 1 i Ribnjak te dnevnih mjerenja količina palih na kišomjerne stanice Udovičić, Ruda-Rosandići i Gljev.....	35
Slika 5.6. Autokorelogrami sušnih i vlažnih razdoblja.	37

Popis tablica

Tablica 4.1. Opis vrijednosti koeficijenta korelacije (Lisčina i Lisjak, 2014.)	13
Tablica 4.2. Godišnje oborine i suma godišnjih oborina.....	23
Tablica 4.3. Srednji mjesečni i godišnji protoci rijeke Rude	27
Tablica 5.1. Autokorelacija izdašnosti i količina oborina, izvor rijeke Rude	33
Tablica 5.2. Kroskorelacija izdašnosti i količina oborina, izvor rijeke Rude.....	36

1. Uvod

Krški tereni građeni su od niza različitih morfoloških oblika i formi među kojima značajno mjesto zauzimaju krški izvori. Po svojim karakteristikama i svojstvima, o kojima će biti više govora u drugom poglavlju ovoga rada, krški izvori su prepoznatljivi i unikatni, a jedan od boljih primjera krškog izvora je izvor rijeke Rude. Izvor se koristi za vodoopskrbu dijela Cetinske krajine i zagorskog dijela bivše općine Solin, a formira i istoimenu rijeku Rudu koja je s oko 10 kilometara toka najveći prtok rijeke Cetine.

Zadatak i cilj ovog diplomskog rada je dokazati vezu između oborina palih na slivno područje rijeke Rude i njezina protoka. Promjena protoka javlja se kao posljedica palih oborina na slivno područje pa su u tu svrhu korišteni podaci s kišomjernih stanica Udovičić, Ruda-Rosandići i Gljev koji su statistički obrađeni te podaci s hidroloških stanica Ruda, Ruda 1 i Ribnjak. Na temelju srednjih dnevnih protoka s hidroloških stanica napravljeni su hidrogrami za razdoblje od 2012. do 2016. godine te hidrogram minimalnih, srednjih i maksimalnih srednjih protoka navedenog razdoblja, a pomoću podataka kišomjernih stanica određen je hod godišnjih oborina za svaku od tih stanica te srednji dnevni za sve tri stanice u vremenu od 2012. do 2016. god.

Promjene protoka javljaju se kao posljedica promjene količine oborina palih na sliv, a mogu se prikazati različitim statističkim metodama obrade podataka. Nakon prikupljanja i obrade podataka, u ovom slučaju protoka i oborina, napravljena je korelacijska, autokorelacijska i kroskorelacijska analiza vremenskih nizova.

Koeficijentom korelacije, kao jednim od produkta korelacijske analize, dokazuje se snaga veze između dvije varijable, odnosno između protoka i oborina. Na temelju dnevnih, mjesečnih i godišnjih podataka protoka i oborina napravljena je korelacija te prikazana grafovima raspršenosti pri čemu su korištene srednje vrijednosti količina oborina za tri kišomjerne stanice. Autokorelacijskom analizom protoka određeno je vrijeme utjecaja tj. efekt memorije u danima. Kroskorelacijskom analizom uspoređuju se vremenski nizovi i računaju zaostajanja između varijabli (protoci i oborine), što je u ovom slučaju napravljeno na temelju dnevnih podataka protoka i oborina. U radu su kroskorelacijske analize mjerenja vremenskih nizova protoka i oborina obavljena u isto vrijeme stoga nije trebalo napraviti nulto poravnanje.

2. O kršu općenito

Pojam krš odnosi se na terene građene topivim stijenama (uglavnom dolomiti i vapnenci) sa specifičnim hidrološkim, hidrogeološkim i morfološkim značajkama. Krški tereni zauzimaju oko polovice površine Republike Hrvatske. Tri su glavna preduvjeta za nastanak krša. Prvi je postojanje stijena podložnih kemijskoj razgradnji uslijed djelovanja vode. Drugi je post-tektonsko postojanje pukotina i prislina kao mjesta kroz koje prodire voda. Treći preduvjet je klimatske prirode i za njegovo ispunjenje potrebne su velike količine oborina jer se krški tereni ne razvijaju na područjima s manje od 250 do 300 mm godišnje oborine te su velike oscilacije između sušnih i vlažnih razdoblja. Tek kada su ovi preduvjeti ispunjeni, dolazi do okršavanja koje rezultira pojavom krških oblika na površini i u podzemlju.

Kalcit, kao sastavni mineral karbonatnih stijena, iznimno je podložan kemijskom trošenju uslijed djelovanja vode (obogaćene ugljičnom kiselinom) što je poveznica nastanka krša na/u karbonatnim terenima.

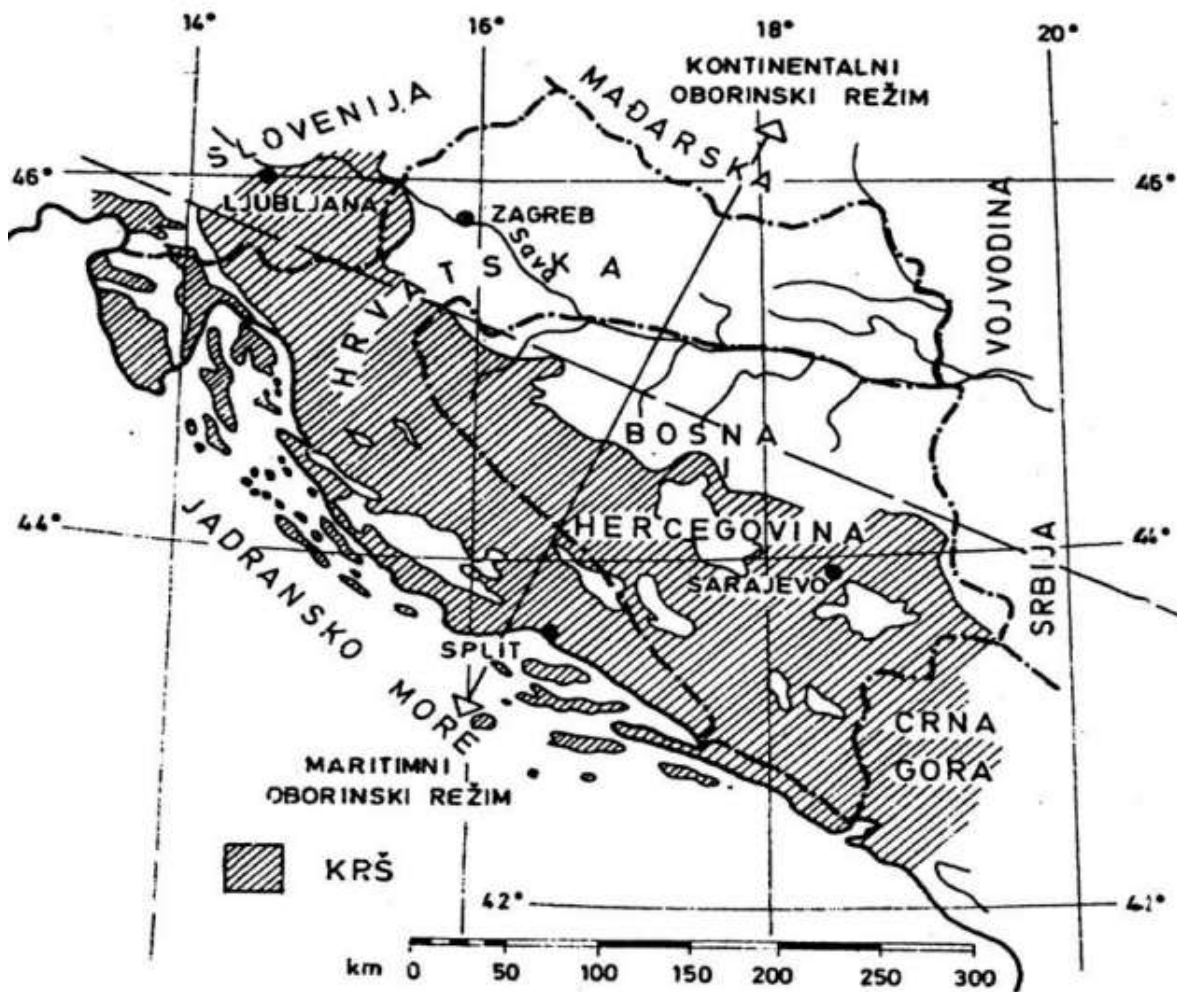
Kemijska reakcija nastanka krša:



Ova reakcija može biti i reverzibilna uslijed čega dolazi do nastajanja sedre.

Od karakterističnih krških oblika i formi izdvajaju se škrape, vrtače, jame, špilje, kaverne, krška polja, krške zavale i kanjoni (Parlov, 2017/2018).

Sliv rijeke Rude dio je Dinarskog krša (*Slika 2.1.*) koji se pruža u smjeru SZ-JI. Ime je dobio po planini Dinari, a prostire se od Alpa na istoku Italije, preko Slovenije, Republike Hrvatske, Bosne i Hercegovine, Crne Gore pa sve do Albanije. Krš je razvijen u debelim slojevima karbonatnih stijena koji mogu biti debeli i do nekoliko kilometara, a unutar kojih je česta pojava dubokih jama koje dopiru do najnižih razina podzemne vode te vrlo brzo variraju i preko 100 metara.



Slika 2.1. Dinarski krš (Banović, 2014)

Hidrografska mreža u kršu, kao iznimno anizotropnoj sredini, uglavnom je slabo razvijena na površini, a budući da je svaki krški vodonosnik poseban, vrlo je teška generalizacija. Zbog svoje otvorenosti krški vodonosnici su pod velikim utjecajem događaja na površini terena, a dimenzije pukotina kroz koje se kreće voda variraju od milimetarskih do metarskih dimenzija, i uglavnom se uslijed djelovanja vode stalno šire i povećavaju. Krš skladišti velike količine vode, a zbog brzog i uglavnom okomitog poniranja vode u podzemlje isparavanje je slabijeg intenziteta nego kod nekrških terena. Prilikom istraživanja kretanja vode u kršu poznate su samo ulazna i izlazna komponenta dok je za utvrđivanje svih drugih svojstava i karakteristika vodonosnika potrebno napraviti detaljna geološka istraživanja. Nepoznat put kretanja vode razlog je zbog kojeg se ne računa stvarna brzina, već se pomoću trasera računa prividna brzina. U podzemlju su veće količine vode nego na površini, a ono što se događa u podzemlju i riječ koja ponajbolje opisuje kretanje vode u kršu je „nepredvidivost“, pa tako postoje slučajevi gdje kubici vode

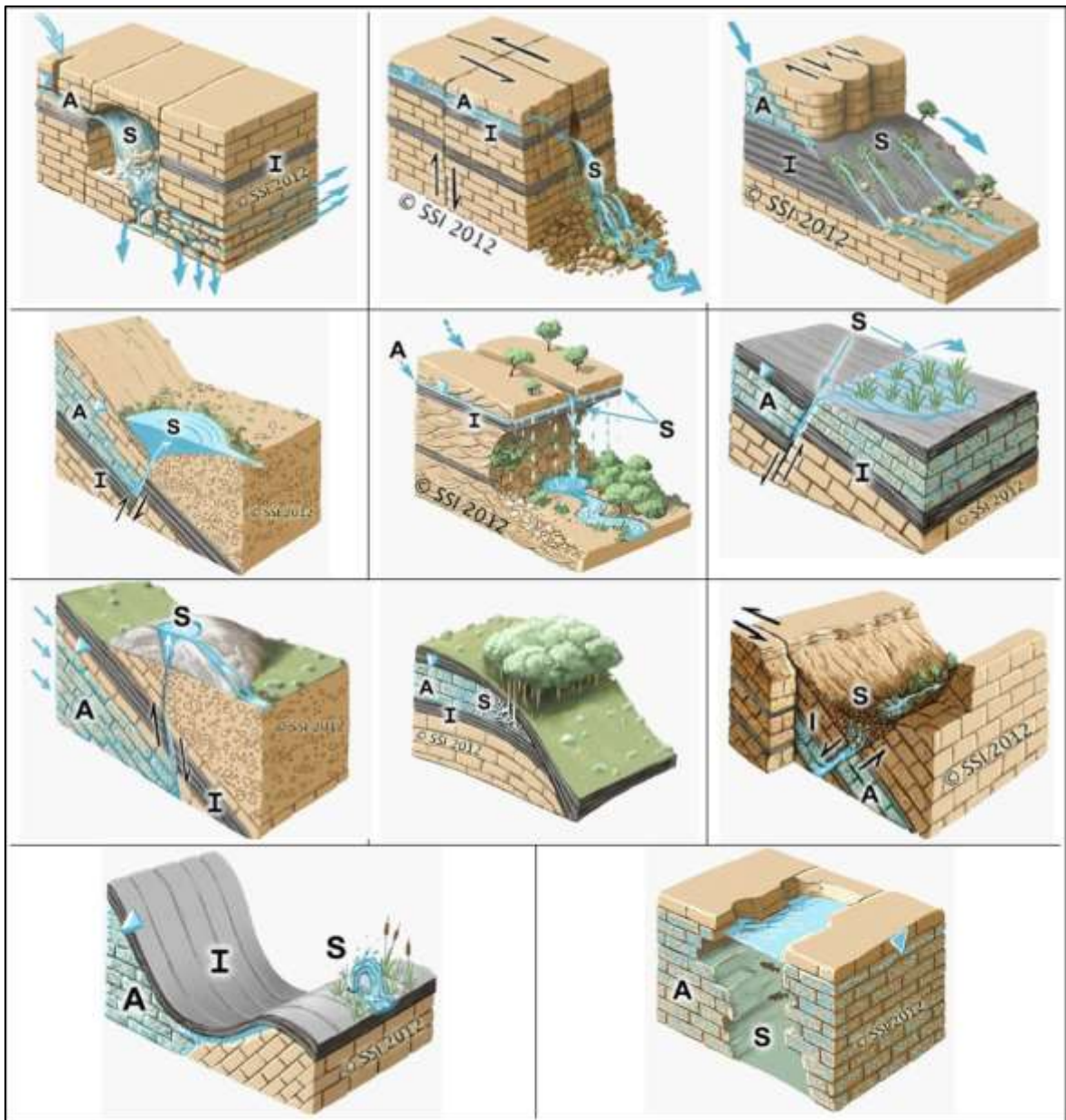
prolaze kroz velike kanale, a samo metar pokraj bušotina može biti potpuno suha. U krškim vodonosnicima ne vrijedi cijeli niz zakona koji se vrlo lako mogu primijeniti u drugim vodonosnicima pa se zbog svega navedenog u kršu često koriste statističke metode i metode analize vremenskih nizova ulaznih i izlaznih parametara, kao što su auto i kroskorelacijske analize.



Slika 2.2. Izvor rijeke Rude

Krški izvori, kao jedna od specifičnih hidrogeoloških formi krša, imaju dvije važne značajke. Prva je velika izdašnost, a druga je promjenjivost kapaciteta, odnosno velika razlika između maksimalnih i minimalnih količina istjecanja što često rezultira zamućenjem vode (Bačani, 2006).

Općenito, krški izvori su mjesta gdje podzemna voda uslijed djelovanja gravitacije ili tlaka izlazi na površinu (*Slika 2.2*). Uglavnom su smješteni u blizini ili na regionalnom baznom nivou ili u drugim slučajevima kada rasjed prekida podzemne kanale. Na *slici 2.3*. prikazani su neki od karakterističnih oblika krških izvora.



Slika 2.3. Najčešći tipovi krških izvora (Preuzeto s <http://springstewardshipinstitute.org/>)
 (A – vodonosnik, I – nepropusni materijal, S – izvor)

3. Značajke istraživanog terena

3.1. Geološke značajke

Za cijeli sliv rijeke Cetine karakteristične su karbonatne naslage trijasa, jure i krede pa tako i na slivu rijeke Rude na kojem dominira kreda. Kvartarni sedimenti zauzimaju velike površine.

Trijaske naslage prevladavaju na području istočnog dijela Kupreškog polja te južno od Glamoča, a zastupljen je klastičnim i karbonatnim naslagama, vapnencima, dolomitima, škriljancima i pješčenjacima.

Jurske naslage prevladavaju na prostoru između Livanjskog i Glamočkog polja, između i oko Šuice i Livna te između Graba i Aržana. Pretežno su zastupljene karbonatnim stijenama, vapnencima i dolomitima, a u manjoj mjeri vapneni lapori i laporoviti vapnenci.

Kredne naslage nalaze na gotovo cijelom području i u njima dominiraju vapnenci. Prijelaz jure u kredu nema znakove prekida sedimentacije, kontinuiran je. Vapnenci su dobro uslojeni i posebno se ističu naslage debljine preko 1000 metara na prostoru između Livanjskog i Duvanjskog polja.

Paleogen je uglavnom razvijen u obliku vapnenaca i vapnenačko-laporovitih klastita, a neogen u laporovitom facijesu. Neogenske naslage imaju važnu ulogu u hidrogeološkom smislu. Transgresivno leže na mezozojskim i paleogenskim naslagama, a nalaze se u depresijama Kupreškog, Duvanjskog, Livanjskog i Roškog polja. U dijelovima Duvanjskog i Livanjskog polja one su ugljenonosni bazeni. Neogenske naslage na uzvišenju Fatelj, između Kupresa i Zlosela čine razvodnicu crnomorskog i jadranskog sliva.

Kvartarne naslage iznimno su raširene jer su istaložene u poljima, gdje su pretežno gline, pijesci i šljunci; u dolinama gdje su uglavnom glinovito-pjeskoviti materijali; i na padinama planina gdje je uglavnom sipar.

Podlogu Livanjskog, Kupreškog, Duvanjskog, Glamočkog i Roškog polja uglavnom čine neogenski glinovito-laporoviti sedimenti s debljim ili tanjim površinskim pokrivačem. Planine koje se nalaze unutar sliva Rude pretežno su građene od karbonatnih

stijena, vapnenaca i dolomita. Jedino je Stožer, planina iznad Kupresa, građena od klastičnih naslaga donjeg trijasa.

Donjotrijaske naslage i neogenski glinovito-laporoviti sedimenti glavni su razlog pojave velikog broja izvora na lijevoj strani Cetine kojima pripada i izvor Rude.

Iznimno je značajno Buško blato, umjetna akumulacija kružnog oblika koja se nalazi na jugoistočnom dijelu Livanjskog polja kod koje se ispod kvartarnih naslaga nalazi krška vapnena podloga.

Najznačajniji planinski masiv na slivu je planina Kamešnica koja je dio dinarske tektonske jedinice, a osnovna strukturna građa joj je široka sinklinala čija uzdužna os mijenja svoj smjer. Najznačajniji rasjed je onaj koji prolazi jugozapadnim rubom Livanjskog polja, a većim je djelom prekriven kvartarnim naslagama pa se na tom dijelu nalazi velik broj ponora (Veliki ponor, Bristovi, Opaki i Kameniti). Na zapadnom dijelu Buškog blata nalaze se Sinjski ponor, Prodrikoža, Stara mlinica i Liskovača. Uz sami izvor rijeke Rude dominiraju dobro slojeviti vapnenci s proslojcima dolomita i breča (Magdalenić, 1970; Raić i sur., 1982).

3.2. Hidrogeološke značajke

Podzemne veze utvrđene trasiranjem uglavnom su okomite na Dinarski smjer pružanja, odnosno okomito na SZ-JI.

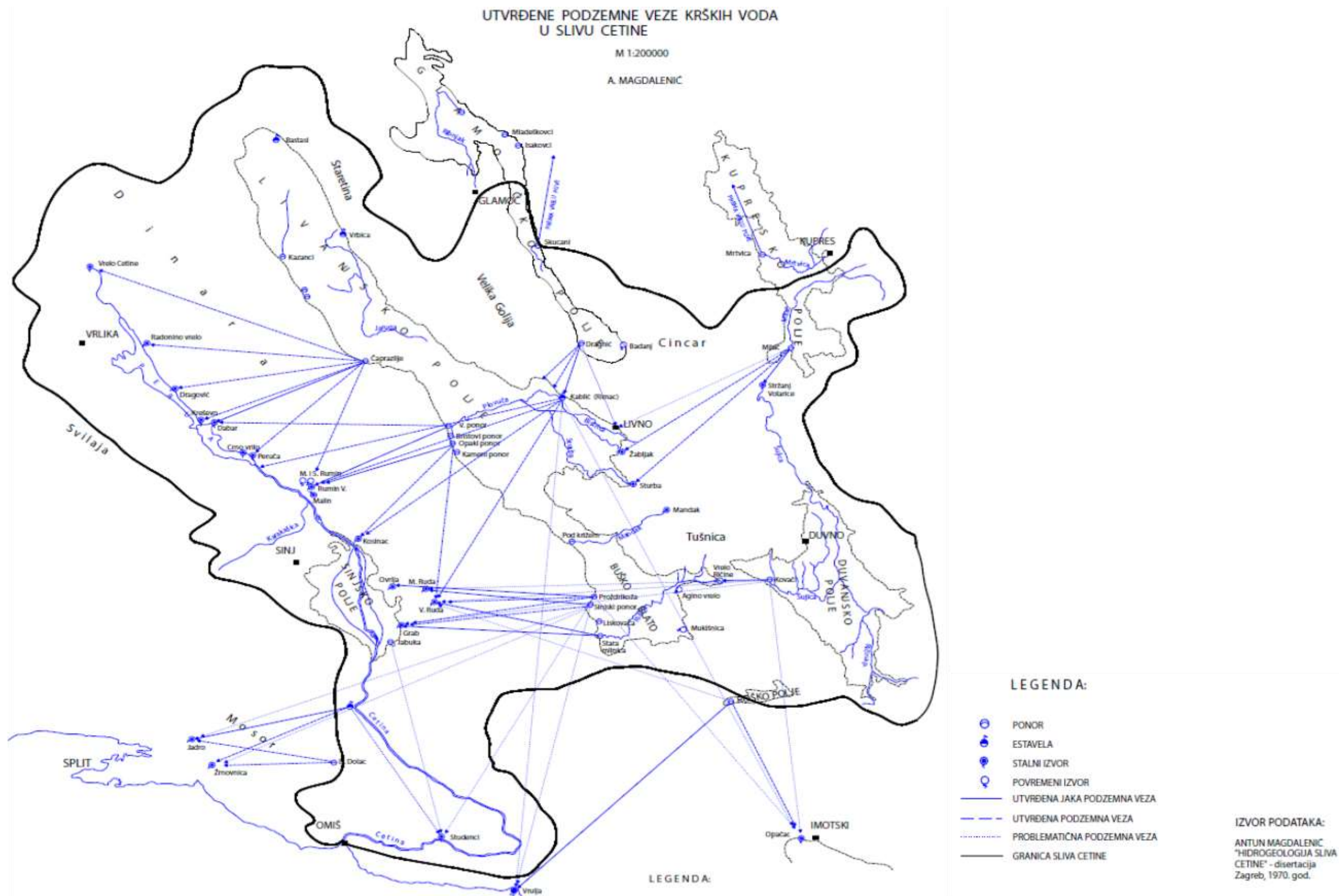
Razvodnice u kršu općenito je teško odrediti jer se ne poklapaju s orografskim razvodnicama kao što je to slučaj kod nekrških područja, već su određene litologijom i strukturno-tektonskim odnosima. S obzirom da su povezane s karakteristikama i pravcima okršavanja, razvodnice treba tražiti na granici okršenih vapnenaca s laporima ili glinovitim sedimentima. Ukoliko se razvodnica nalazi unutar istog litološkog sloja, onda se najčešće nalazi duž tjemena antiklinale.

Površinske razvodnice nije problem odrediti jer se podudaraju s granicama okršivih i neokršivih litoloških jedinica, ali podzemne razvodnice su uglavnom mobilne i pomiču se ovisno o količini oborina, tj. sušnim i kišnim razdobljima pa je trasiranjem potrebno dokazati pretpostavljene razvodnice.

Rijeka Ruda dio je sliva rijeke Cetine i u njemu ima veliki značaj s obzirom da je istoimeni izvor jedan od najvećih i najizdašnijih. Na hidrogeološkoj karti (*Slika 3.1.*) prikazane su stijene sliva i njihova hidrogeološka funkcija. Podijeljene su na temelju litoloških karakteristika, tektonskih položaja, hidrogeoloških pojava i izvršenih istražnih radova.

Livanjsko, Kupreško, Duvanjsko, Glamočko i Roško polje odijeljeno je visokim planinskim masivima pa je tok vode iz jednoga u drugo polje moguć isključivo podzemnim putem. Trasiranjem je potvrđena izravna povezanost između Livanjskog i Duvanjskog polja te Buškog blata s izvorom Rude, a preko njih i s Glamočkim i Kupreškim poljem (*Slika 3.2.*). Jedino je komunikacija izvora Rude s Roškim poljem pretpostavljena (Magdalenić, 1970).

Za pojavu velikog broja izvora na lijevoj strani Cetine, kojima pripada izvor Rude, najvažniju ulogu ima kompleks jurskih vapnenaca i dolomita koji se nalazi na potezu od Graba prema Aržanu, a koji predstavlja barijeru podzemnim vodama i usmjerava ih prema stalnim krškim izvorima. Lokalni značaj imaju neogenski glinovito-laporoviti sedimenti koji su također nepropusni i presijecaju put podzemnih voda čime ih dovode do izvora.



Slika 3.2. Karta utvrđenih podzemnih veza krških voda sliva Cetine (Banović, 2014.)

3.3. Klimatološke značajke

Klima na slivu rijeke Rude iznimno je raznolika, pa se tako razlikuje submediteranska ili kontinentalna klima s ostrim zimama i sušnim ljetima u blizini samog izvora rijeke Rude, gdje je prosječna godišnja temperatura oko 12°C, do planinsko-alpske, oštre klime na 50-ak kilometara udaljenom Kupreškom polju, gdje je prosječna godišnja temperatura oko 5 °C i gdje je godišnje 55 snježnih dana. Najvažniji klimatski čimbenici koji utječu na formiranje veličine otjecanja su temperatura te količina i režim oborina. Temperatura zraka na području sliva rijeke Rude ovisna je o nadmorskoj visini i blizini Jadranskog mora, tako da mjesta bliža Jadranskom moru i mjesta manjih nadmorskih visina imaju više temperature što ima veliki utjecaj na isparavanje i količine snijega.

Vlažnost zraka je također važan faktor jer pri povećanju deficita vlažnosti (kod određene temperature) raste isparavanje i smanjuje se otjecanje. Vlažnost raste s nadmorskom visinom i kreće se od 72% u Sinju do 85% na Kupresu (Magdalenić, 1970).

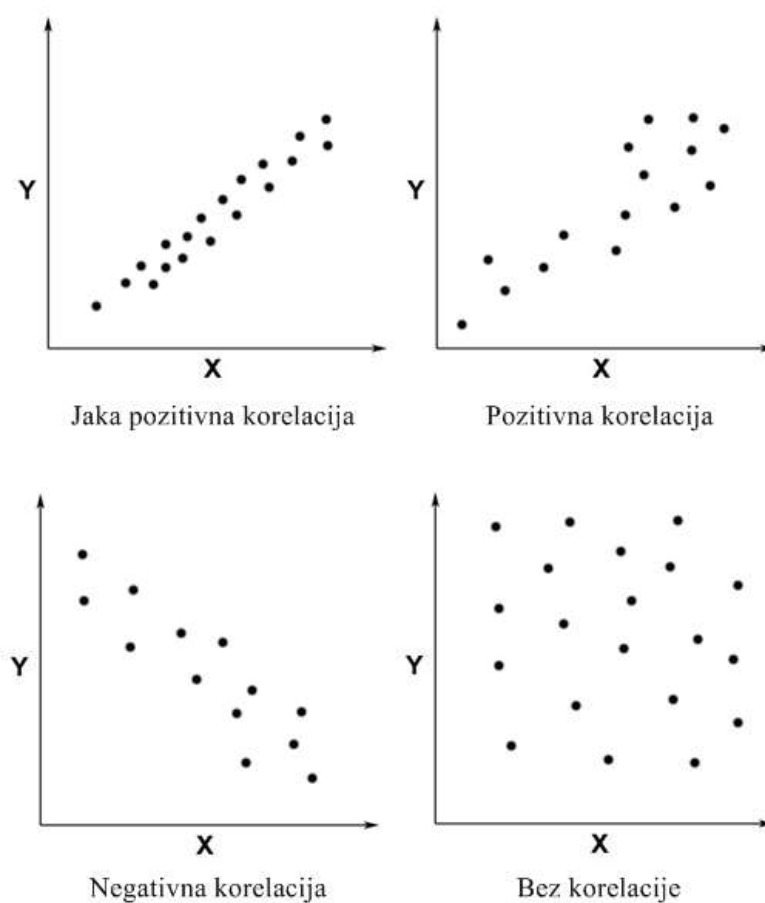
Zbog utjecaja mediteranske klime, dio sliva rijeke Rude koji se nalazi s južne strane Kamešnice karakteriziraju duža i toplija ljeta te blaže zime nego što je to slučaj za sjeverni dio. Tu dolazi do sudara utjecaja Jadranskog mora i unutrašnjosti što rezultira čestim izmjenama vlažnih i suhih, odnosno toplih i hladnih zračnih masa. Na području sliva količina oborina raste s nadmorskom visinom mjesta, ali opada s udaljenosti od mora. Ljetni mjeseci su sušni pa u razdoblju od lipnja do kolovoza padne samo 17% godišnjih oborina dok od listopada do prosinca, tj. u najvlažnijem razdoblju, padne 34% godišnjih oborina. Česte su poplave u Sinjskom polju od siječnja do travnja, a zadržavanje snijega na višim predjelima (iznad 1000 m n. m.) ima značajan utjecaj na oborinski režim (Baraka, 2015).

4. Teorijska podloga i korišteni podaci

4.1. Korelacijska analiza

Korelacija predstavlja međusobni odnos između dvije varijable pri čemu se pomoću poznavanja podataka jedne varijable može izračunati ili pretpostaviti vrijednost druge. Tako postoji veza između oborina i protoka, a grafičkim prikazom najlakše se uočava.

Najveća korist i primjena korelacije u hidrologiji je nadopunjavanje podataka koji nisu mjereni ili za nastavljanje niza izmjerenih podataka čime se predviđaju budući događaji. Prema smjeru povezanosti korelacija može biti pozitivna i negativna (*Slika 4.1.*), a prema obliku povezanosti linearna i nelinearna.



Slika 4.1. Vrste korelacije

Tablica 4.1. Opis vrijednosti koeficijenta korelacije (Lisčina i Lisjak, 2014.)

Apsolutna vrijednost koeficijenta korelacije	Jačina povezanosti
$ r = 1$	Potpuna korelacija
$0,8 \leq r < 1$	Jaka korelacija
$0,5 \leq r < 0,8$	Srednje jaka korelacija
$0,2 \leq r < 0,5$	Relativno slaba korelacija
$0 < r < 0,5$	Neznatna korelacija
$ r = 0$	Bez korelacije

Jednadžba korelograma:

$$\rho(h) = \frac{\sum xx_h - n_h \bar{x} \bar{x}_h}{n_h s s_h} \quad (4-1)$$

gdje je:

x - vrijednost za čiju se lokaciju korelogram računa.

x_h - vrijednost s kojom se uspoređuje na udaljenosti „ h “,

n_h - broj parova podataka na udaljenosti „ h “,

\bar{x} - srednja vrijednost na lokaciji „ z “ (ako se jednim uzorkom smatra više mjerenja),

\bar{x}_h - srednja vrijednost uzorka na udaljenosti „ h “,

s - standardna devijacija uzorka na lokaciji „ z “ (ako ih je više),

s_h - standardna devijacija uzorka na udaljenosti „ h “.

Varijanca je prosječno kvadratno odstupanje od aritmetičke sredine.

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (4-2)$$

σ – varijanca; $i=1,2,3,\dots,N$; \bar{x} – srednja vrijednost uzorka.

Za razliku od varijance koja bilježi promjene jedne varijable, *kovarijanca* pokazuje koliko se dvije varijable mijenjaju zajedno u odnosu na njihove srednje vrijednosti.

$$C(x, x_h) = \frac{\sum x x_h - n_h \bar{x} \bar{x}_h}{n_h} \quad (4-3)$$

gdje je:

C – kovarijanca.

x - vrijednost za čiju se lokaciju korelogram računa,

x_h - vrijednost s kojom se uspoređuje na udaljenost „ h “,

n_h - broj parova podataka na udaljenosti „ h “,

\bar{x} - srednja vrijednost na lokaciji „ z “ (ako se jednim uzorkom smatra više mjerenja),

\bar{x}_h - srednja vrijednost uzorka na udaljenosti „ h “.

Koeficijent korelacije (Pearsonov koeficijent korelacije) se izvodi iz kovarijance:

$$r(x, y) = \frac{c(x, x_h)}{s_x s_y} \quad (4-4)$$

gdje je:

$r(x, y)$ - Pearsonov koeficijent korelacije,

c - kovarijanca dviju varijabli,

x - vrijednosti za čiju se lokaciju korelogram računa,

x_h - vrijednost za čiju se lokaciju korelogram računa,

s_x - standardna devijacija varijable x ,

s_y - standardna devijacija varijable y .

Postotak sličnosti kojim jedna varijabla opisuje vrijednost druge dobije se nakon što kvadrat koeficijenta determinacije $r^2(x,y)$ pomnožimo sa 100 (Musy i Higy, 2011).

4.2. Autokorelacijska analiza

Autokorelacijom se utvrđuje periodičnost i zavisnost serija (u ovom slučaju protoka). Autokorelacija je neprekinuti niz intervala promatranog skupa mjerenja, a interval koji se promatra označava se s Y i postavlja se na ordinatu grafa. Svaka od točki promatranja označena je s Y_t i treba biti nezavisna od drugih točki u nizu, dakle treba biti odvojena konstantnim intervalom vremena.

S obzirom da je Y_t poznat, vrijeme točke promatranja odredi se:

$$X_t = \Delta t \quad (4-5)$$

gdje je Δt udaljenost između točaka.

Cijeli vremenski period sekvence označava se s:

$$T = \Delta t (n-1) \quad (4-6)$$

gdje je N broj točaka zapažanja.

Autokorelacijska funkcija je važan pojam pri obradi i analizi podataka dobivenih autokorelacijom, a ona definira linearnu ovisnost sukcesivnih vrijednosti podataka unutar vremenskog niza s obzirom na njihov vremenski odmak. Vremenski niz uspoređuje se sam sa sobom uz povećanje vremenskog odmaka, te računa koeficijent autokorelacije „ $r(k)$ “ za pojedine vremenske odmake „ k “:

$$r(k) = \frac{C(k)}{C(0)} \quad (4-7)$$

$$C(0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (4-8)$$

$$C(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N \pm k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x}) \quad (4-9)$$

gdje je:

C – kovarijanca,

$r(k)$ – koeficijent autokorelacije,

k – vremenski odmak,

$x_i = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_N)$ – vremenska serija,

N – broj podataka,

$m(r(k) = r_0, \dots, r_k, \dots, r_m)$ – broj koeficijenata autokorelacije.

Karakteristika autokorelacije je opadanje zavisnosti između članova vremenske serije s porastom vremenskog odmaka.

Efekt memorije je vrijeme potrebno da „ $r(k)$ “ padne ispod vrijednosti 0,2, a prikazuje trajanje reakcije sustava na ulazni impuls. Duži vremenski period odmaka znači veća retencijska svojstva krškog sustava (Musy i Higy, 2011).

4.3. Kroskorelacijska analiza

Kroskorelacijom se promatraju dva vremenska niza i međusobno se uspoređuju, pri čemu su bitna dva faktora. Prvi je snaga veze između promatranih intervala, a drugi je veličina odmaka u vremenu ili prostoru s obzirom na točku najveće izjednačenosti.

Prilikom svake korelacije, na samom početku, bitno je odrediti zajednički početak kako bi se usporedba lakše napravila. Taj početak se označi s „k“ = 0.

Linearna zavisnost izlazne i ulazne vremenske serije u odnosu na njihov odmak računa se kroskorelacijskom funkcijom (KKF).

Koeficijent korelacije računa se:

$$r_{xy}(k) = \frac{C_{XY}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (4-10)$$

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N \pm k} (x_i - \bar{x})(y_{i+k} - \bar{y}) \quad (4-11)$$

gdje je:

$r_{xy}(k)$ – kroskorelacijska funkcija,

k – vremenski odmak,

σ_x i σ_y – standardne devijacije ulazne i izlazne serije,

x_t i y_t – vremenske serije,

N – broj podataka,

C – kovarijance.

Kada su ulazni podaci slučajni tj. kada su dvije ulazne varijable međusobno nepovezane, onda kroskorelacijska funkcija „ $r_{xy}(k)$ “ prikazuje reakciju sustava na ulazni impuls, a ukoliko su varijable povezane, onda pokazuje značajnost i vezu ulazne i izlazne serije.

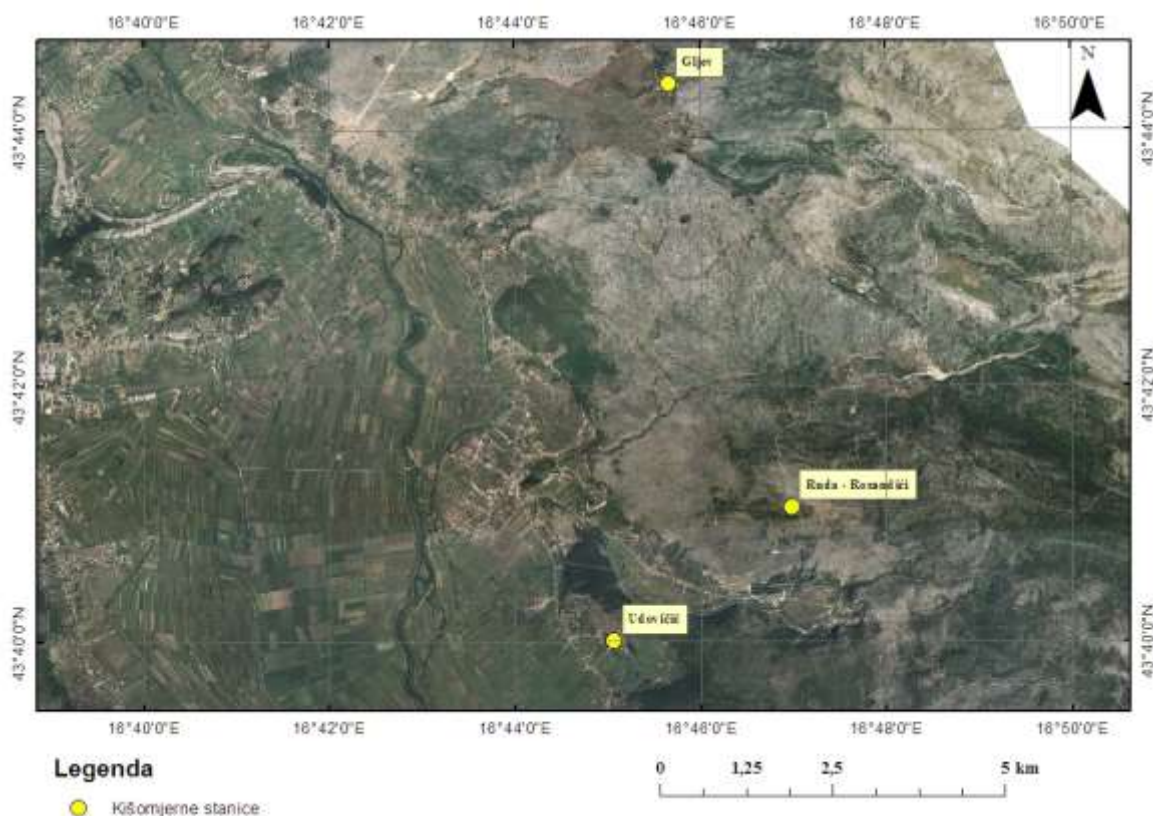
Kroskorelacijska funkcija nije simetrična i ako je „ $r_{xy}(k) > 0$ “ za „ $k > 0$ “ onda je izlazna serija ovisna o ulaznoj, a ako je „ $r_{xy}(k) < 0$ “ za „ $k < 0$ “ onda je ulazna ovisna o izlaznoj. Kada je kroskorelacijska funkcija sa središtem u „ $k = 0$ “ simetrična, onda ulaz ne utječe na izlaz te ulazna i izlazna serija ovise o nekoj trećoj uz identične odgovore.

Vrijeme kašnjenja izlazne funkcije u odnosu na ulaznu određuje vremenski odmak „ k “ kod maksimalne vrijednosti „ $r_{xy}(k)$ “ (Musy i Higy, 2011).

Izračun kroskorelacijskih funkcija proveden je pomoću namjenski izrađenog računalnog VBA programa (Posavec i sur., 2017) u koji se unose podaci dva vremenska niza (u ovom slučaju protoci i oborine).

4.4. Kišomjerne i hidrološke stanice

Količina oborina mjeri se u mm, a 1 mm predstavlja 1 litru po metru kvadratnom. U svrhu izračuna količine oborina koje su pale na područje sliva rijeke Rude korišteni su podaci s tri kišomjerne stanice: Gljev, Udovičić i Ruda-Rosandići (Slika 4.2.). Stanica Udovičić nalazi se uz sami istočni rub Sinjskog polja, četiri kilometra zapadno od izvora rijeke Rude, na nadmorskoj razini od 320 metara, a stanice Gljev i Ruda-Rosandići su smještene sjeverno od izvora rijeke Rude, u brdskom predjelu na visini od 495, odnosno 529 m n. m.



Slika 4.2. Lokacije korištenih kišomjernih stanica

Protok je količina vode koja prođe poprečnim profilom vodotoka u jedinici vremena (m^3/s), a kontinuirano se mjeri na hidrološkim stanicama. S obzirom da se voda koja izvire iz izvora rijeke Rude na samom izvoru račva u jedan dio koji odlazi za ribnjak i drugi dio koji nastavlja prirodnim tokom, kako bi dobili prirodnu izdašnost izvora potrebno

je zbrojiti oba vodotoka, odnosno zbrojiti podatke s dvije hidrološke stanice (Ruda 1 i Ribnjak) (Slika 4.3.).



Slika 4.3. Lokacije hidroloških stanica na rijeci Rudi

Ribnjaci na Rudi su rađeni u dvije faze. U prvoj fazi, koja je započela 01.04.1992. godine, izgrađen je ribnjak na desnoj obali rijeke, pa je limnigraf Ruda 1, koji se nalazio nizvodno od ribnjaka, kontrolirao količine vode koje ribnjak koristio.

U drugoj fazi napravljen je ribnjak nizvodno s lijeve strane, a voda se (i danas) kroz most prebacuje na drugu stranu. S obzirom da se mjesto na kojem se voda iz lijevog ribnjaka izlijeva u Rudu nalazi nizvodno od limnigrafa Ruda 1, napravljena je nova mjerna postaja Ribnjak koja se nalazi na dovodnom kanalu.

Zbog toga je od 01.04.1992. godine potrebno na protok s postaje Ruda 1 (*Slika 4.4.*) pridodati podatke s postaje Ribnjak (*Slika 4.5.*) kako bi se dobio prirodni dotok vode, a s tim i izdašnost izvora.

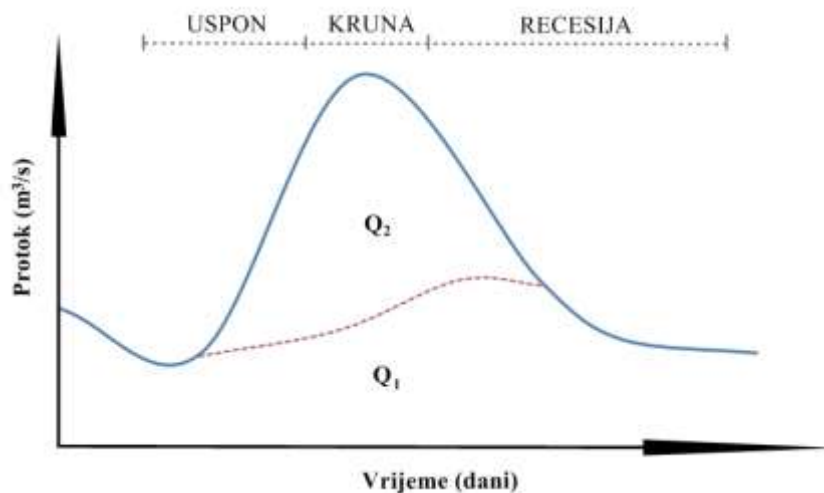


Slika 4.4. Hidrološka stanica Ruda 1



Slika 4.5. Hidrološka stanica Ribnjak

Količina protoka vode koja teče vodotokom prije, nakon i za vrijeme kiše najčešće se prikazuje hidrogramom, a osnovni dijelovi su mu uspon, kruna i recesija (*Slika 4.6.*).



Slika 4.6. Hidrogram

Mnogi su faktori uključeni u formiranje oblika hidrograma, a najvažniji su trajanje kiše, intenzitet tj. promjenjivost intenziteta kiše, oblik sliva i područje na slivu koje je zahvaćeno kišom. Za razliku od samog crtanja hidrograma, njegove komponente (bazni dotok, međudotok, podzemni dotok i oborina pala na korito vodonosnika) nije jednostavno odrediti.

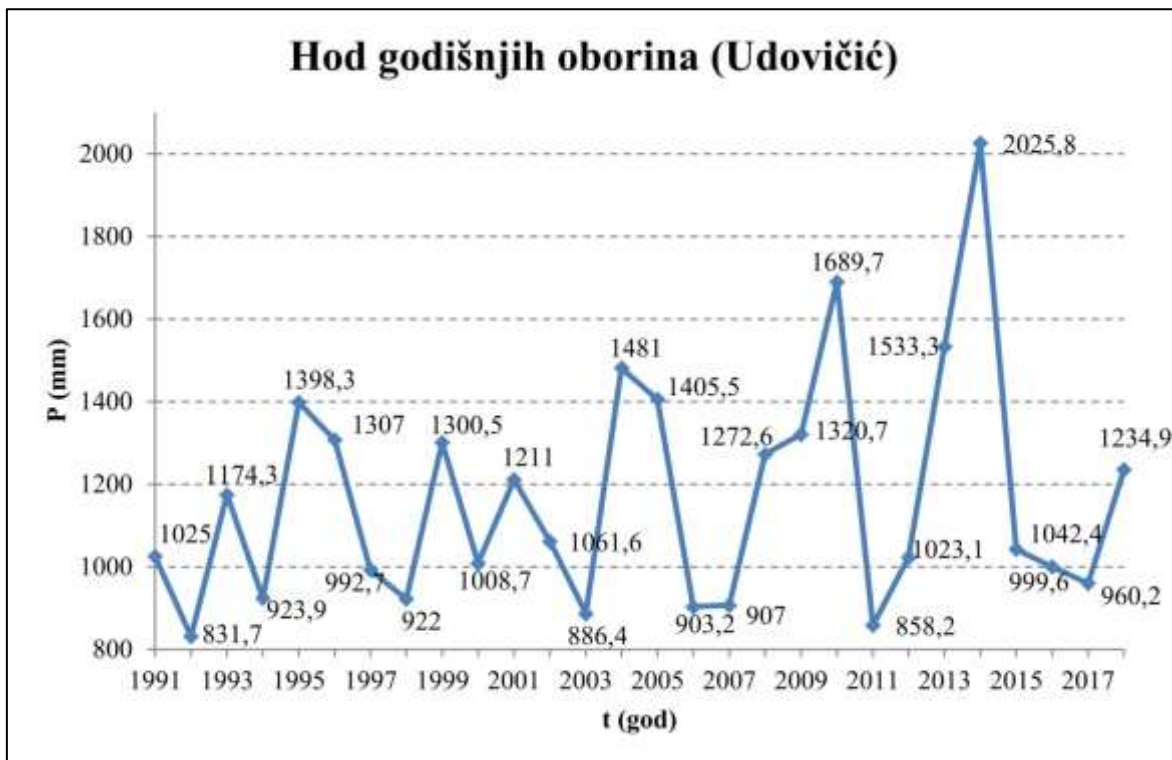
U praksi, hidrogram može biti koristan za procjenu količine vode koja prihranjuje podzemlje tj. procjenu zaliha podzemne vode. Na mjestu točke infleksije, na recesijskom dijelu hidrograma završava površinsko dotjecanje (Q_2) i cijelo dotjecanje odvija se pod utjecajem podzemne vode (Q_1) tj. baznog dotoka (*Slika 4.6.*).

Iz priložene tablice (*Tablica 4.2.*) uočljivo je da su godišnje sume godišnjih oborina na kišomjernim stanicama dosta bliske. Godišnji trendovi po kojima bi se moglo zaključiti da se radi o sušnim ili kišnim godinama također su slični na sve tri stanice, a srednja godišnja količina oborina prema navedenim podacima najveća je na Gljevu i iznosi 1276,8 mm na godinu.

Tablica 4.2. Godišnje oborine i suma godišnjih oborina

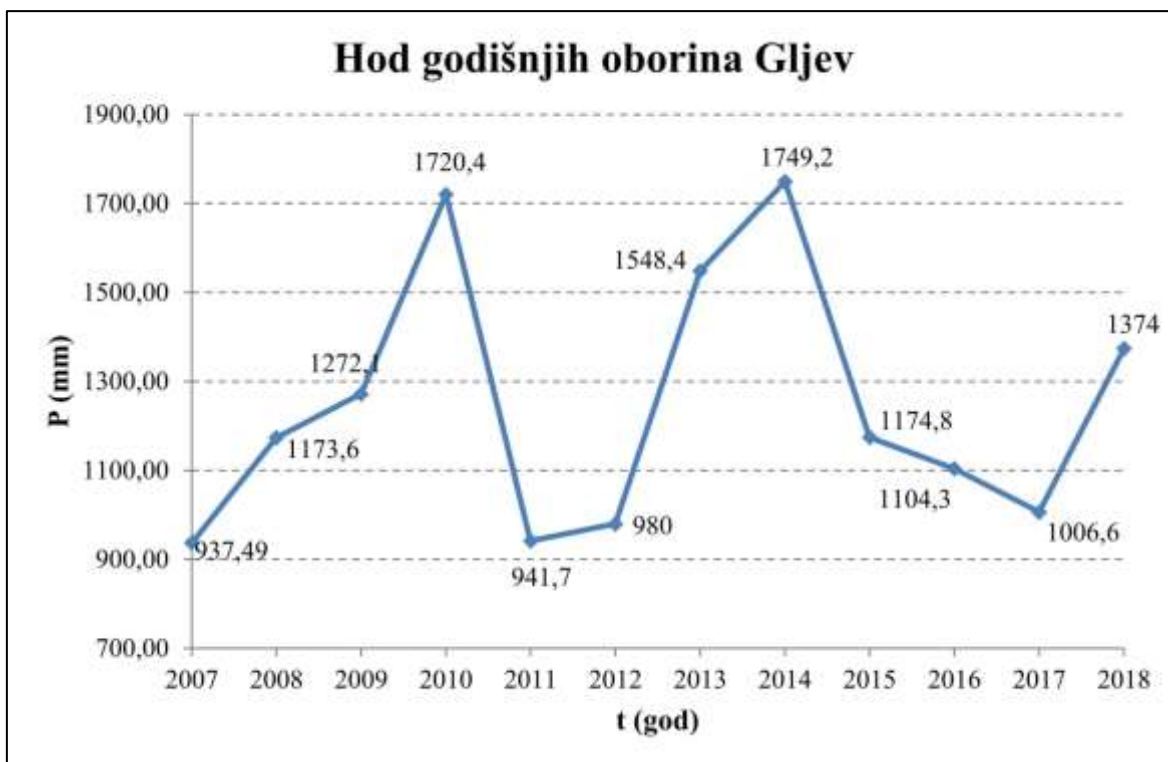
Godina	Količina oborina (mm)		
	Udovičić	Gljev	Ruda (Rosandići)
1991	1025	-	-
1992	831,7	-	-
1993	1174,3	-	-
1994	923,9	-	-
1995	1398,3	-	-
1996	1307	-	-
1997	992,7	-	-
1998	922	-	916,9
1999	1300,5	-	1267,9
2000	1008,7	-	917,8
2001	1211	-	1095,4
2002	1061,6	-	1101
2003	886,4	-	761,6
2004	1481	-	1273,2
2005	1405,5	-	-
2006	903,2	-	766,3
2007	907	-	909
2008	1272,6	1173,6	985,5
2009	1320,7	1272,1	1133
2010	1689,7	1720,4	1663,8
2011	858,2	941,7	-
2012	1023,1	980	1084,5
2013	1533,3	1548,4	1488,8
2014	2025,8	1749,2	1777,8
2015	1042,4	1174,8	1073,8
2016	999,6	1104,3	1021
2017	960,2	1006,6	940,8
2018	1234,9	1374	1254,4
Srednja godišnja količina:	1167,9	1276,8	1128,0

Najveća količina oborina na postaji Udovičić (*Slika 4.7.*) izmjerena je 2014. godine i iznosila je 2025,8 mm, a najmanja je izmjerena 1992. godine i iznosila je 831,7 mm.



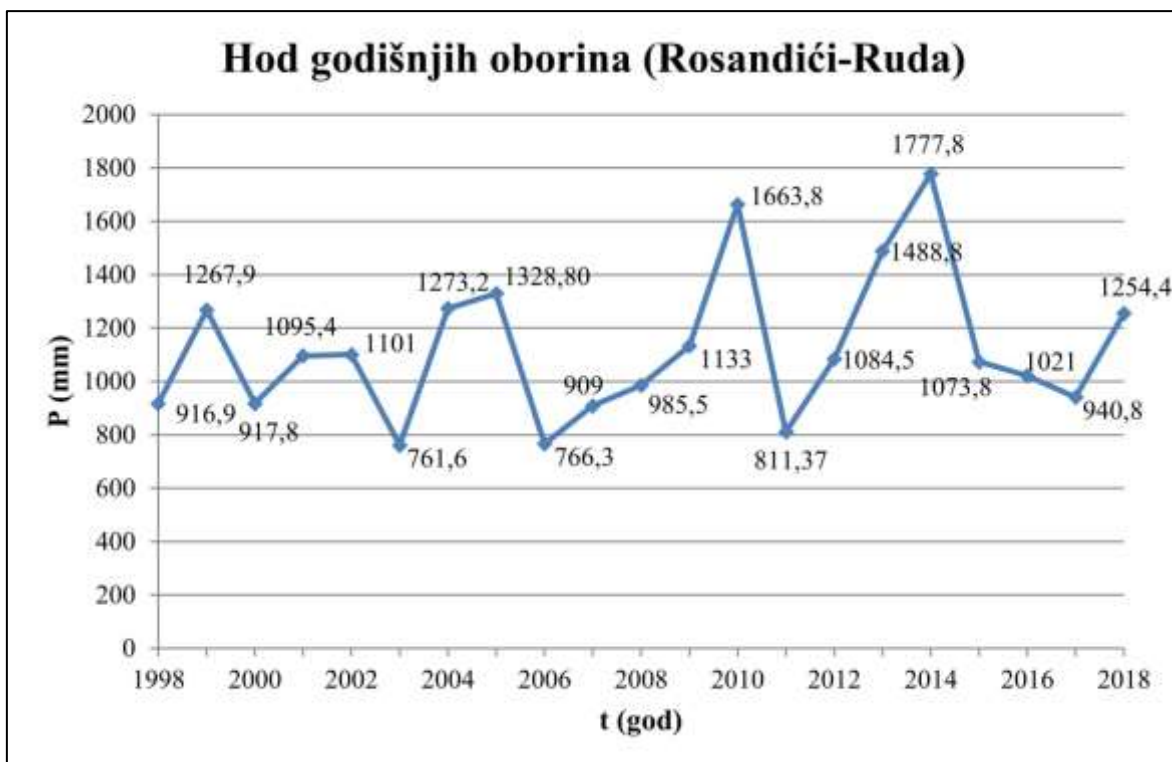
Slika 4.7. Hod godišnjih oborina na postaji Udovičić za razdoblje od 1991. do 2018. godine.

Mjerenja na stanici Gljev (*Slika 4.8.*) započela su 2007. god. što je relativno kratak period mjerenja. Za početnu godinu mjerenja, 2007., nema godišnjih podataka zbog toga što mjerenja nisu bila kontinuirana tijekom cijele godine. Podatak o palim količinama oborine u 2007. godini dobiven je korelacijom s podacima kišomjernih stanica Udovičić i Ruda-Rosandići, a iznosio je 937,49 mm. Najveća količina oborina izmjerena je 2014. godine što je ista godina kao i u Udovičićima za isto razdoblje i iznosila je 1749,2 mm, a najmanja je izračunata 2007. god. i iznosila je 937,49 mm.



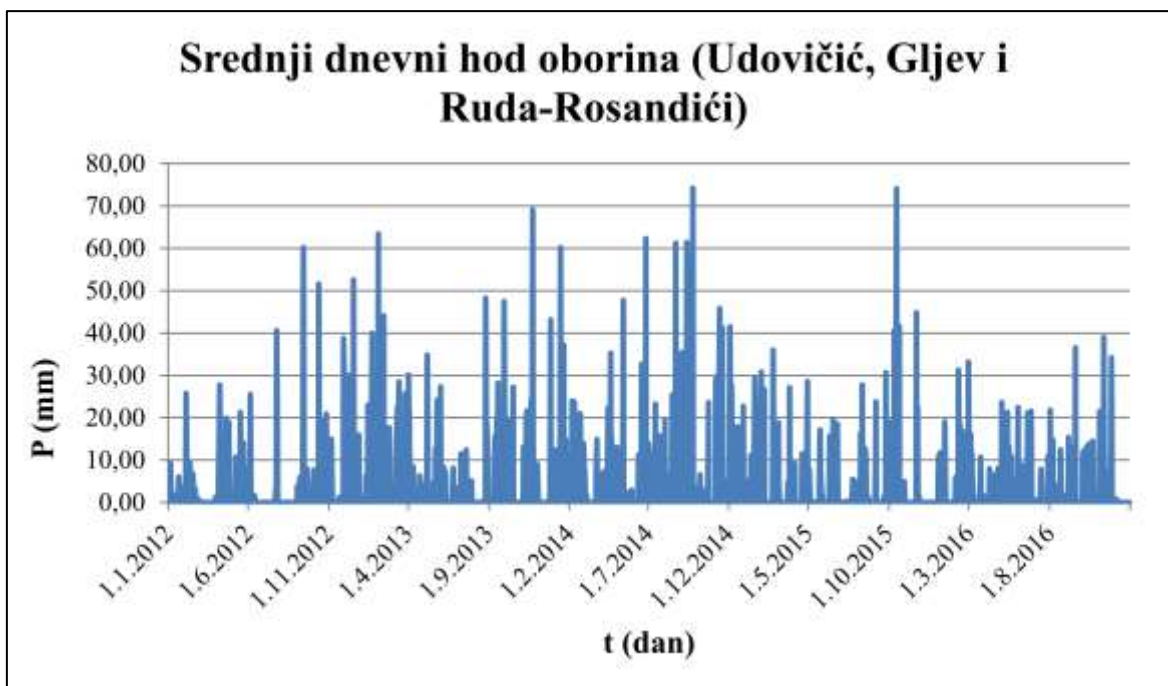
Slika 4.8. Hod godišnjih oborina na postaji Gljev za razdoblje od 2007. do 2018. godine.

Mjerenja na stanici Ruda-Rosandići (Slika 4.9.) započela su 1997. god. i na njoj nema godišnjih podataka za sve godine od početka mjerenja jer neki mjeseci nisu mjereni, ali usporedbom i korelacijom s podacima njoj najbliže kišomjerne stanice (Udovičić) procijenjeni podaci za 2005. i 2011. iznosili su 1328,80, odnosno 811,37 mm. Ti podaci su dobiveni tako da su u omjer stavljeni poznati podaci iz obje kišomjerne stanice, a na temelju aritmetičke sredine omjera procijenjen je nepoznati podatak. Uzimajući u obzir procijenjene i mjerene podatke, najveća količina oborina izmjerena je 2014. godine i iznosila je 1777,8 mm, a najmanja je izmjerena 2003. god. i iznosila je 761,6 mm.



Slika 4.9. Hod godišnjih oborina na postaji Ruda-Rosandići za razdoblje od 1998. do 2018. godine.

Iz hidrograma srednjeg dnevnog hoda oborina kišomjernih stanica Udovičić, Gljevi i Ruda-Rosandić (Slika 4.10.) ne može se izvući „okvirni“ zaključak, osim da 2016. godine nije bilo dnevnih oborina većih od 40 mm, koje su se barem jednom godišnje pojavljivale unutar analiziranog vremenskog intervala.

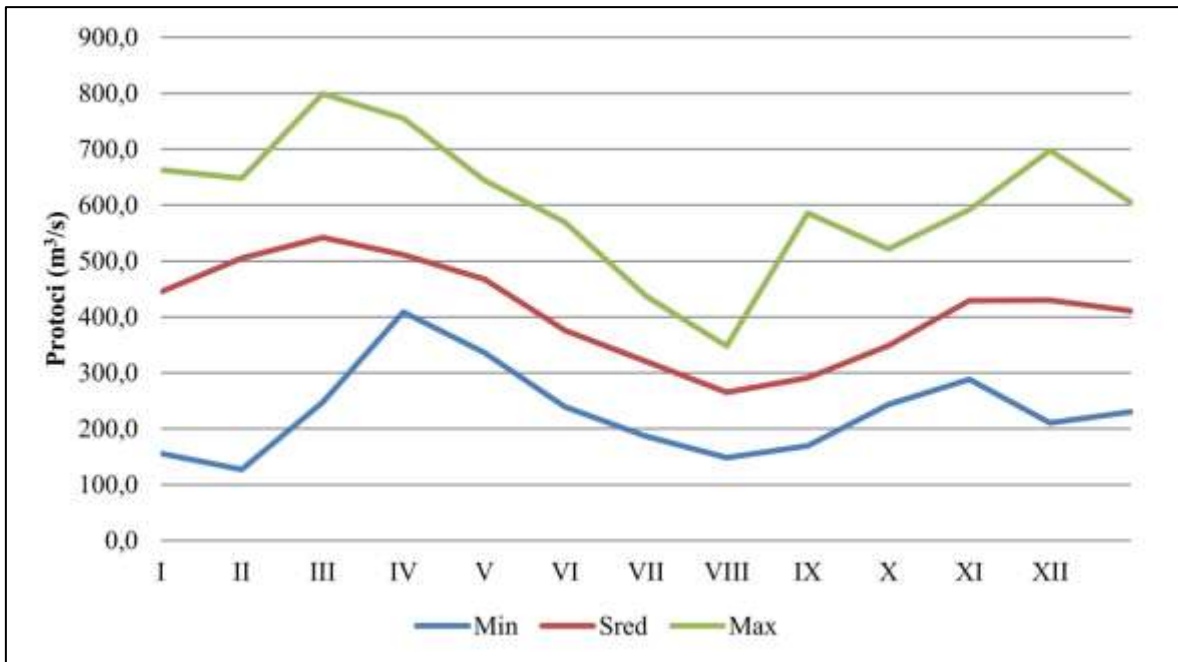


Slika 4.10. Srednji dnevni hod oborina stanica Udovičić, Gljev i Ruda-Rosandići za razdoblje od 2012. do 2016. godine.

U tablici 4.3. i na slici 4.11. uočava se kako su minimalni srednji mjesečni protoci rijeke Rude u ljetnim mjesecima (lipanj i srpanj), a kako su maksimalni u drugoj polovici zime (veljača i ožujak).

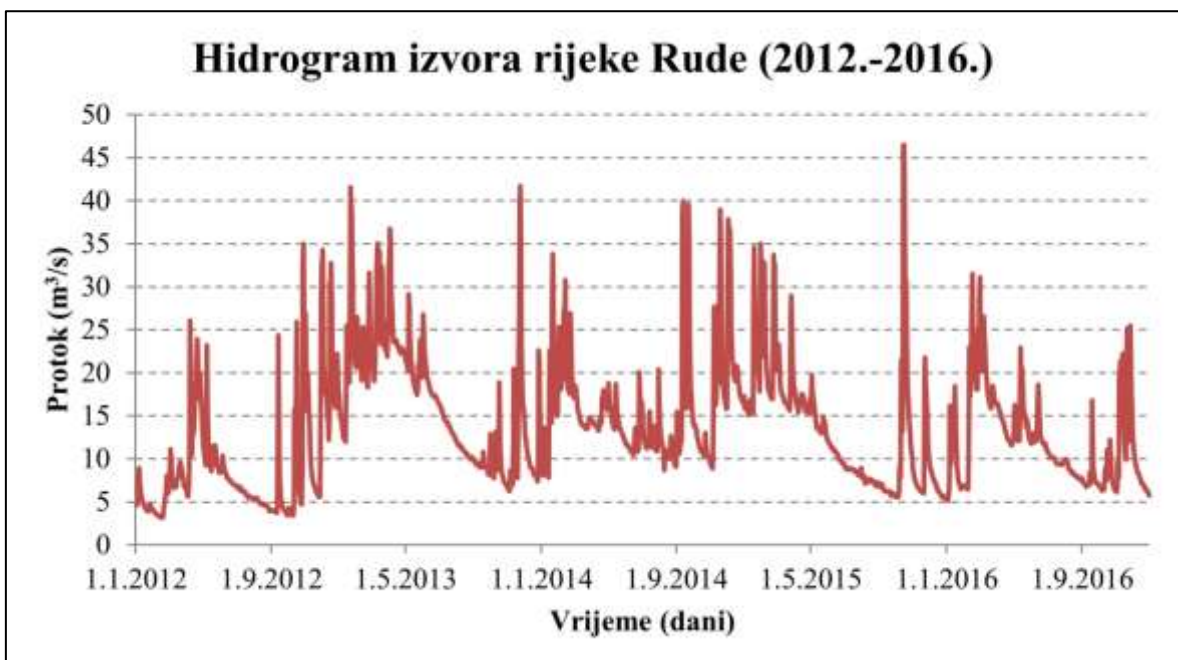
Tablica 4.3. Srednji mjesečni i godišnji protoci rijeke Rude

god.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	sred
2012	156,2	127,2	247,4	450,7	336,1	239,5	186,8	148,1	169,5	320,2	349,9	658,0	282,4
2013	662,8	631,5	798,9	755,1	644,9	569,3	437,8	335,5	279,4	294,2	443,3	336,4	515,8
2014	477,4	613,2	463,6	448,8	453,3	367,5	405,1	348,0	585,6	363,3	592,0	698,2	484,7
2015	624,6	647,8	593,1	494,4	448,3	319,8	269,1	229,8	188,7	521,7	288,1	210,4	403,0
2016	303,2	504,8	607,3	408,8	455,6	384,0	305,5	263,5	234,5	243,5	471,6	246,3	369,0
min	156,2	127,2	247,4	408,8	336,1	239,5	186,8	148,1	169,5	243,5	288,1	210,4	230,1
sred	444,8	504,9	542,0	511,6	467,7	376,0	320,9	265,0	291,5	348,6	429,0	429,9	411,0
max	662,8	647,8	798,9	755,1	644,9	569,3	437,8	348,0	585,6	521,7	592,0	698,2	605,2



Slika 4.11. Minimalni, maksimalni i srednji mjesečni protoci rijeke Rude za razdoblje od 2012. do 2016. godine.

Na hidrogramu rijeke Rude za razdoblje od 2012. do 2016. godine (Slika 4.12.) uočava se pad količine protoka u ljetnim mjesecima što se uvelike poklapa sa srednjim dnevnim hodom oborina stanica Udovičić, Gljev i Ruda-Rosandići za isto razdoblje.



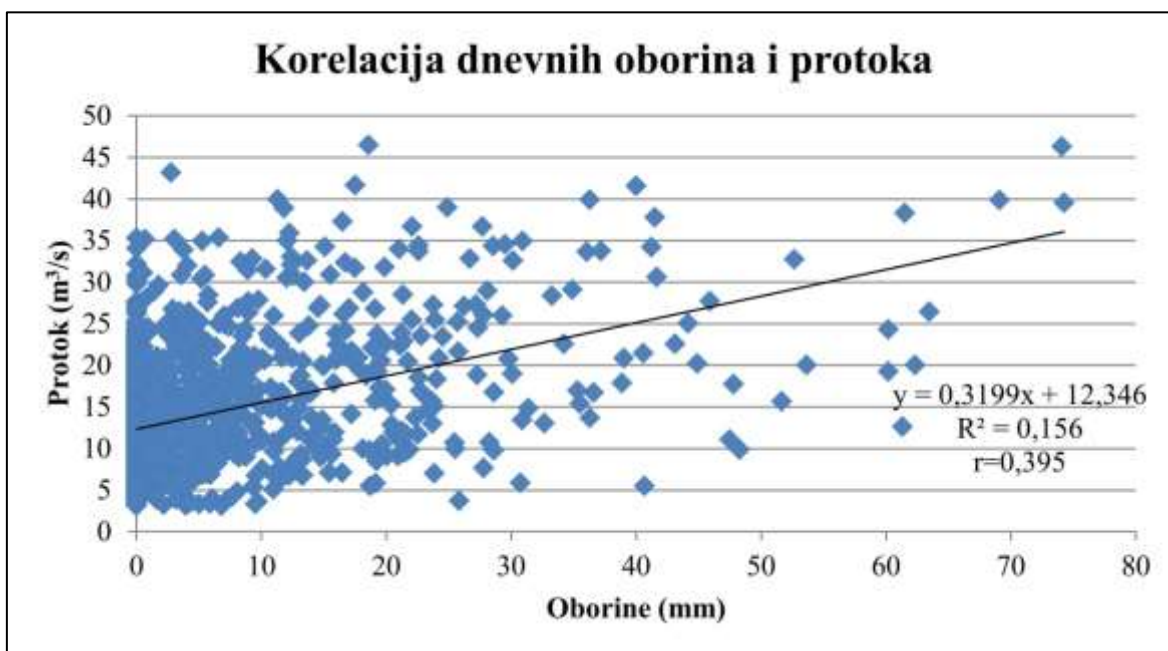
Slika 4.12. Dnevni hidrogram rijeke Rude za razdoblje od 2012. do 2016. godine.

5. Rezultati

5.1. Rezultati obrade podataka korelacijom

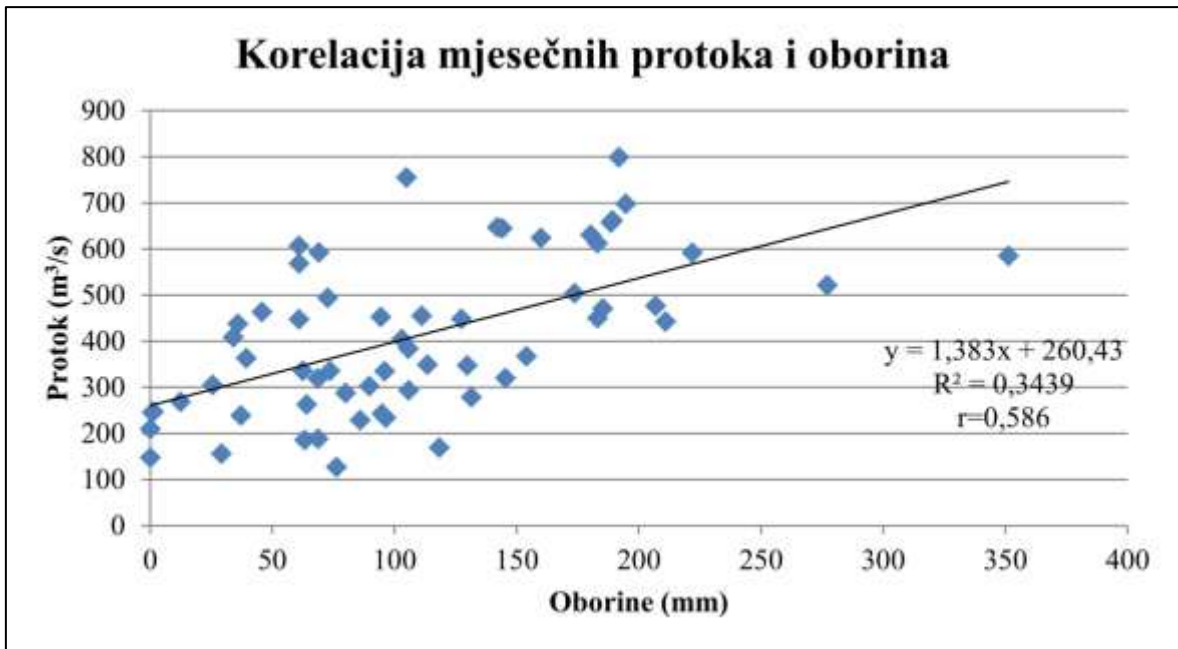
Korelacijskom analizom dobiveni su grafički prikazi rezultata tj. dijagrami rasprostiranja koji daju odličnu vizualnu predodžbu odnosa između protoka i oborina na temelju dnevnih (*Slika 5.1.*) mjesečnih (*Slika 5.2.*) i godišnjih (*Slika 5.3.*) podataka. Grafički prikaz rezultata efektivniji je i jasniji od navođenja podataka u tablicama jer trenutnim pogledom na graf može se dobro procijeniti korelacija. Za prikaz je korišten jednostavni linearni model. Pozitivan je smjer povezanosti kod sva tri korelograma.

Koeficijent korelacije (r) dnevnih protoka i srednjih dnevnih količina oborina na kišomjernim stanicama Udovičić, Ruda-Rosandići i Gljev za razdoblje od 2012. do 2016. (*Slika 5.1.*) iznosi 0,395 što je relativno slaba korelacija (*Tablica 4.1.*), a što se može zaključiti i samim pogledom na graf na kojem se uočava vrlo velika disperzija podataka.



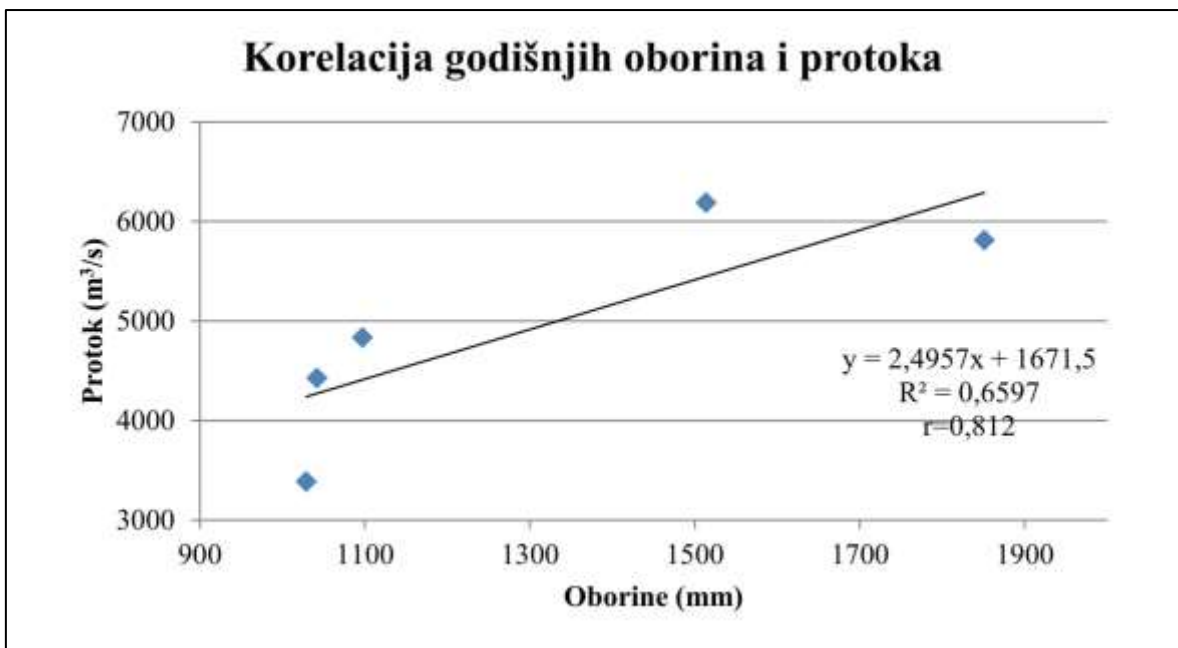
Slika 5.1. Korelacija dnevnih protoka i srednjih dnevnih količina oborina na kišomjernim stanicama Udovičić, Ruda-Rosandić i Gljev za razdoblje od 2012. do 2016. godine.

Koeficijent korelacije (r) mjesečnih protoka i srednjih mjesečnih količina oborina na kišomjernim stanicama Udovičić, Ruda-Rosandić i Gljev za razdoblje od 2012. do 2016. (*Slika 5.2.*) iznosi 0,586 što je srednje jaka korelacija (*Tablica 4.1.*).



Slika 5.2. Korelacija mjesečnih protoka i srednjih mjesečnih količina oborina na kišomjernim stanicama Udovičić, Ruda-Rosandić i Gljev za razdoblje od 2012. do 2016. godine.

Koeficijent korelacije (r) godišnjih protoka i srednjih godišnjih količina oborina na kišomjernim stanicama Udovičić, Ruda-Rosandići i Gljev za razdoblje od 2012. do 2016. (Slika 5.3.) iznosi 0,812 što je jaka korelacija (Tablica 4.1.).



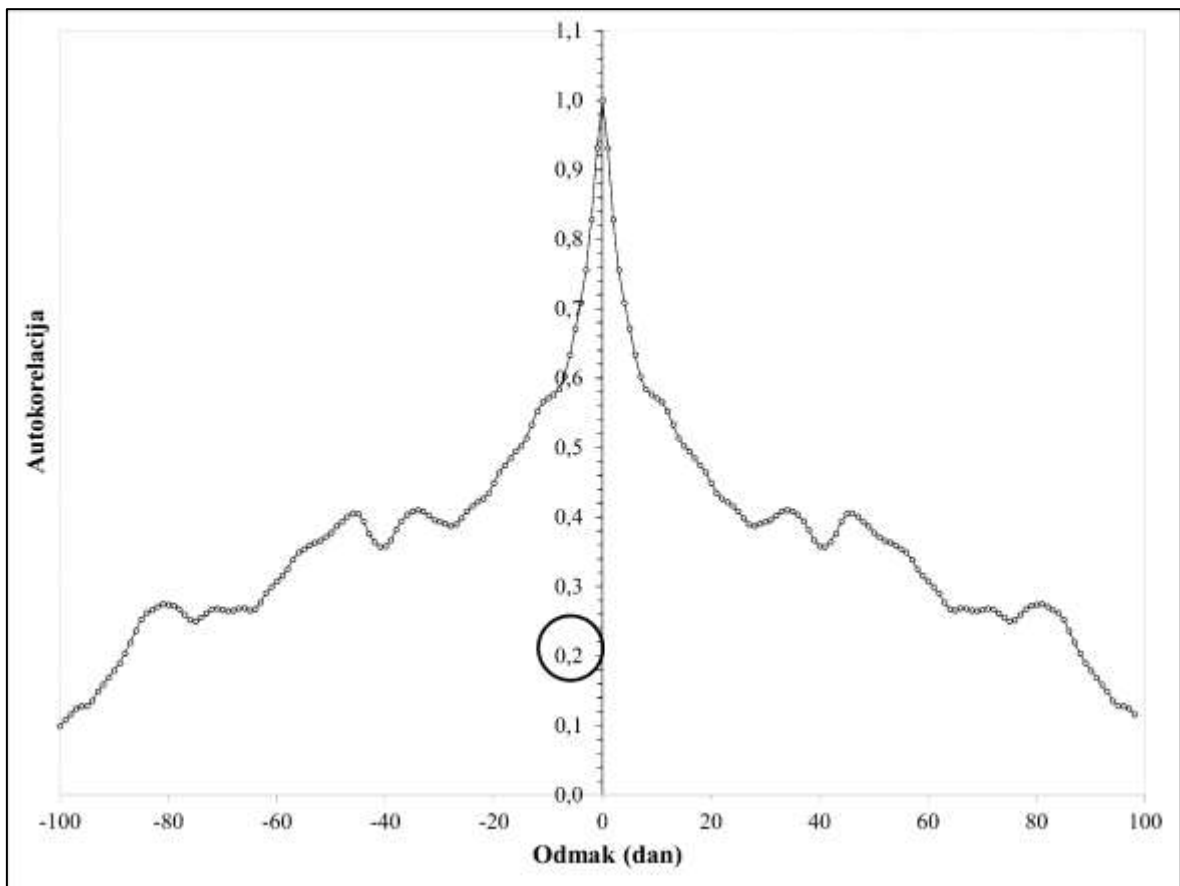
Slika 5.3. Korelacija godišnjih protoka i srednjih godišnjih količina oborina na kišomjernim stanicama Udovičić, Ruda-Rosandić i Gljev za razdoblje od 2012. do 2016. godine.

Usporedbom grafova dnevnih, mjesečnih i godišnjih korelacija protoka i oborina vidljivo je kako se korelacija povećava s povećanjem vremena očitavanja podataka. Tako ona varira od relativno slabe korelacije (0,395) dnevnih do jake korelacije (0,812) godišnjih podataka. Ova razlika vrijednosti korelacija objašnjena je dnevnom kroskorelacijskom analizom oborina (pogledati poglavlje 5.3.) koja je dala zakašnjenje različito od nule.

5.2. Rezultati obrade podataka autokorelacijskom analizom

Primjenom formula (4-7), (4-8) i (4-9) izračunate su vrijednosti koeficijenta autokorelacije „ $r(k)$ “ dnevne izdašnosti izvora rijeke Rude i prikazane u tablici 5.1. Autokorelacijska funkcija je rađena za 100 vremenskih odmakata (dana) na temelju ulaznih podataka srednjih dnevnih protoka izvora.

Analizom autokorelograma (*Slika 5.4.*) odmah se uočava kako krivulja strmo pada od 0 do 27. dana ($r(k) = 0,390$), nakon čega oscilira te dalje pada, ali blažim nagibom. Strmi nagib ovisnosti između članova vremenske serije ukazuje na slabija retencijska svojstva vodonosnika. Drugi dio autokorelacijske funkcije, blažeg nagiba pada ispod vrijednosti 0,2 nakon 89 dana, čime je definiran efekt memorije. Velika vrijednost efekta memorije s obzirom na krški teren od 89 dana ukazuje na jača retencijska svojstva vodonosnika pri nižim razinama podzemne vode. Ovaj zaključak potvrđuje hidrogram prikazan na slici 4.12. gdje su uočljiva sušnija i vlažnija razdoblja unutar jedne godine. Kod vlažnijeg razdoblja vidi se opći porast vrijednosti protoka, a kod sušnijeg razdoblja uočljiv je pad vrijednosti protoka. Porast protoka kod vlažnijeg razdoblja prate kratkotrajni nagli skokovi protoka uzrokovani oborinom, dok opadanje vrijednosti protoka kod sušnijeg razdoblja zbog izostanka većih količina oborine, ne prate nagli skokovi u protoku, nego otjecanje izgleda kao klasično pražnjenje podzemlja.



Slika 5.4. Autokorelogram dnevnih mjerenja izdašnosti izvora rijeke Rude mjenjenih na postajama Ruda 1 i Ribnjak.

Tablica 5.1. Autokorelacija izdašnosti i količina oborina, izvor rijeke Rude

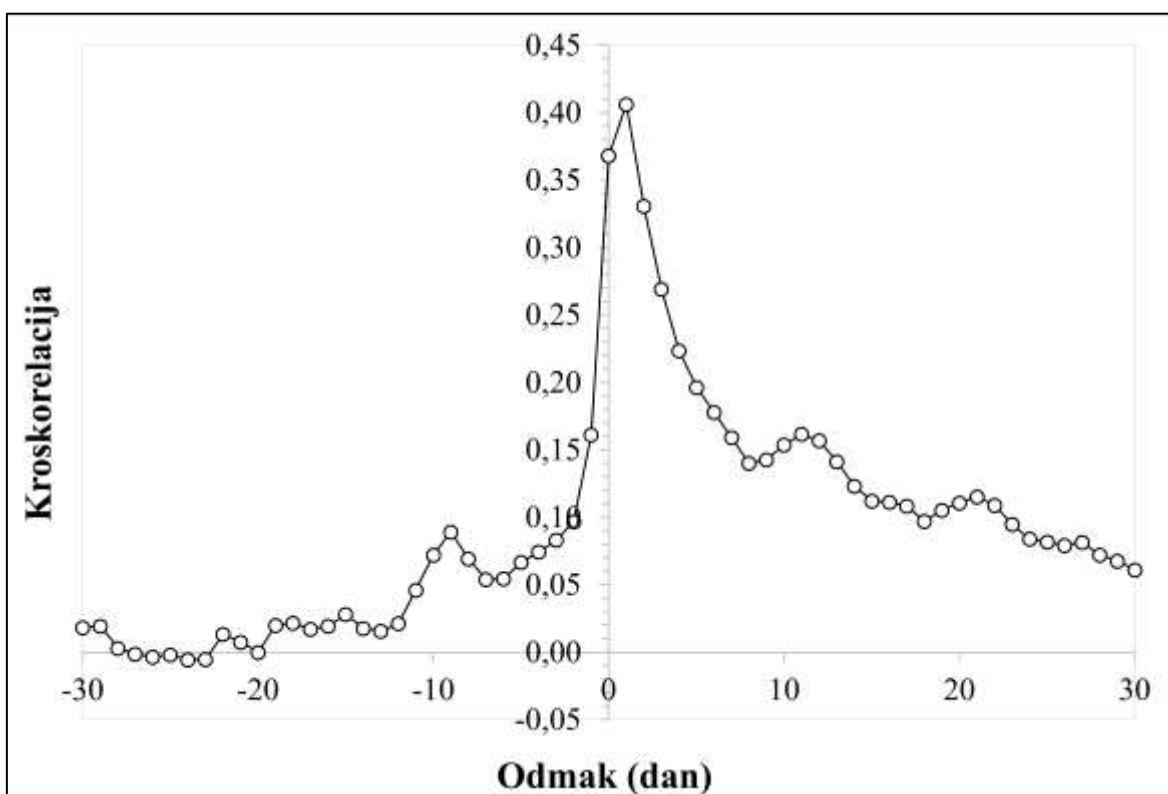
k (dan)	r(k)	k (dan)	r(k)	k (dan)	r(k)
0	1,000	36	0,404	70	0,267
1	0,931	37	0,394	71	0,268
2	0,829	38	0,381	72	0,267
3	0,756	39	0,367	73	0,262
4	0,709	40	0,358	74	0,256
5	0,671	41	0,357	75	0,250
6	0,634	42	0,364	76	0,252
7	0,602	43	0,376	77	0,260
8	0,584	44	0,394	78	0,268
9	0,577	45	0,405	79	0,272
10	0,571	46	0,406	80	0,274
11	0,566	47	0,401	81	0,275
12	0,553	48	0,393	82	0,271
13	0,533	49	0,387	83	0,267
14	0,514	50	0,378	84	0,262
15	0,502	51	0,372	85	0,253
16	0,495	52	0,366	86	0,237
17	0,485	53	0,363	87	0,220
18	0,474	54	0,360	88	0,204
19	0,465	55	0,354	89	0,190
20	0,449	56	0,349	90	0,180
21	0,435	57	0,339	91	0,170
22	0,427	58	0,326	92	0,159
23	0,422	59	0,316	93	0,149
24	0,416	60	0,308	94	0,136
25	0,409	61	0,300	95	0,128
26	0,398	62	0,290	96	0,128
27	0,390	63	0,277	97	0,125
28	0,387	64	0,268	98	0,116
29	0,390	65	0,266	99	0,108
30	0,393	66	0,269	100	0,099
31	0,396	67	0,269		
32	0,403	68	0,266		
33	0,408	69	0,265		
34	0,410	70	0,267		
35	0,409	71	0,268		

nastavak tablice 5.1.

k (dan)	r(k)	k (dan)	r(k)	k (dan)	r(k)
0	1,000	-35	0,409	-70	0,267
-1	0,931	-36	0,404	-71	0,268
-2	0,829	-37	0,394	-72	0,267
-3	0,756	-38	0,381	-73	0,262
-4	0,709	-39	0,367	-74	0,256
-5	0,671	-40	0,358	-75	0,250
-6	0,634	-41	0,357	-76	0,252
-7	0,602	-42	0,364	-77	0,260
-8	0,584	-43	0,376	-78	0,268
-9	0,577	-44	0,394	-79	0,272
-10	0,571	-45	0,405	-80	0,274
-11	0,566	-46	0,406	-81	0,275
-12	0,553	-47	0,401	-82	0,271
-13	0,533	-48	0,393	-83	0,267
-14	0,514	-49	0,387	-84	0,262
-15	0,502	-50	0,378	-85	0,253
-16	0,495	-51	0,372	-86	0,237
-17	0,485	-52	0,366	-87	0,220
-18	0,474	-53	0,363	-88	0,204
-19	0,465	-54	0,360	-89	0,190
-20	0,449	-55	0,354	-90	0,180
-21	0,435	-56	0,349	-91	0,170
-22	0,427	-57	0,339	-92	0,159
-23	0,422	-58	0,326	-93	0,149
-24	0,416	-59	0,316	-94	0,136
-25	0,409	-60	0,308	-95	0,128
-26	0,398	-61	0,300	-96	0,128
-27	0,390	-62	0,290	-97	0,125
-28	0,387	-63	0,277	-98	0,116
-29	0,390	-64	0,268	-99	0,108
-30	0,393	-65	0,266	-100	0,099
-31	0,396	-66	0,269		
-32	0,403	-67	0,269		
-33	0,408	-68	0,266		
-34	0,410	-69	0,265		

5.3. Rezultati obrade podataka kroskorelacijskom analizom

Kroskorelacijom podataka protoka i oborina na slivu rijeke Rude za razdoblje od 2012. do 2016., a čiji su rezultati prikazani grafom (Slika 5.5.) i tablicom (Tablica 5.2.) vidljivo je da kroskorelacijska funkcija svoj maksimum doseže odmah drugi dan nakon pada oborine na slivno područje (Tablica 5.1., $k=1$ za $r_{xy}(k)=0,406$), a traje sve do petog dana (Tablica 6.1., $k=5$ za $r_{xy}(k)=0,196$). Kroskorelacijska funkcija naglo opada do vremena zakašnjenja od 5 dana, nakon čega opada sporije, što ukazuje na isto ponašanje vodonosnika koje je potvrđeno autokorelacijskom funkcijom, prikazanom na slici 5.4.

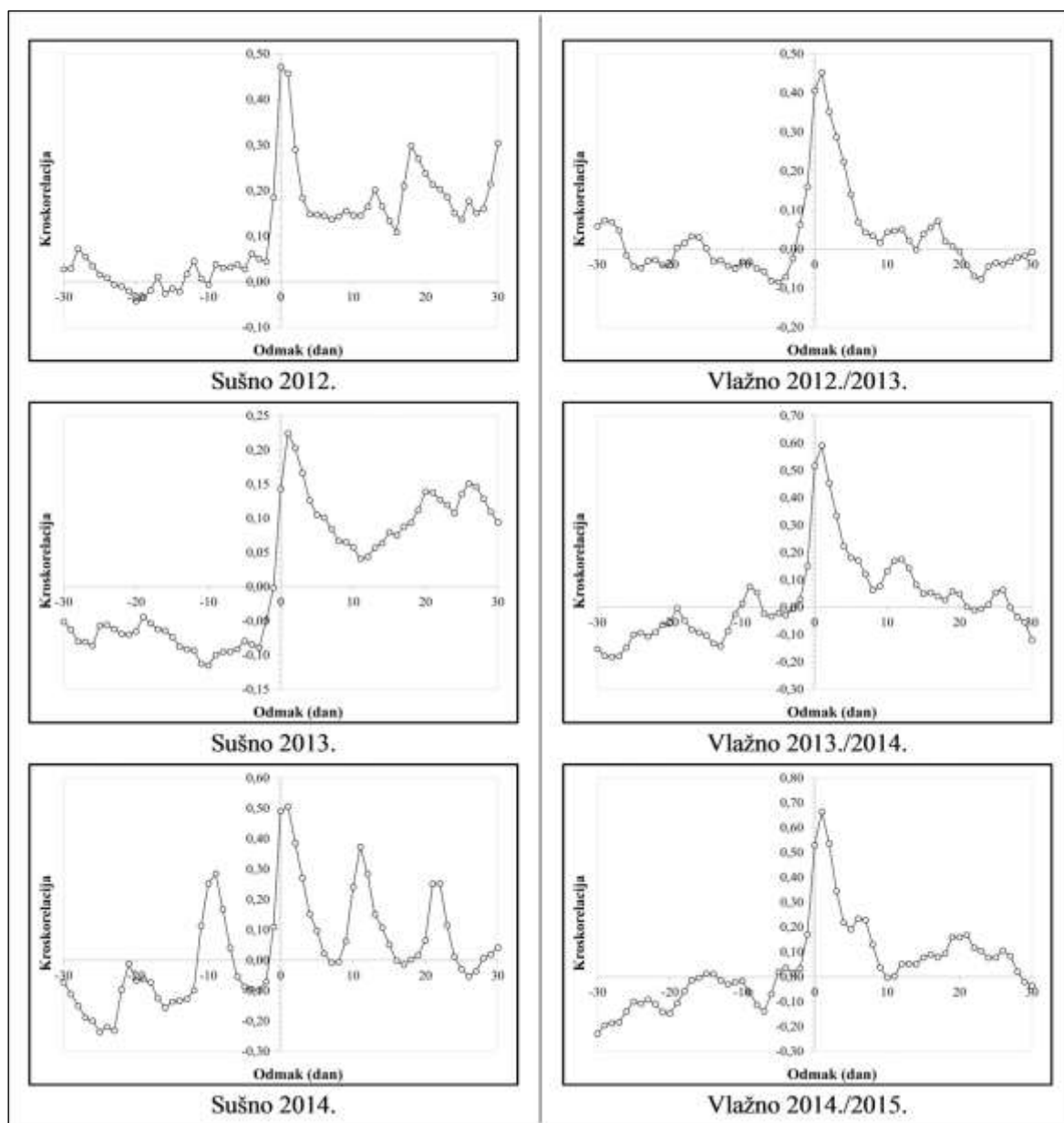


Slika 5.5. Kroskorelogram dnevnih mjerenja izdašnosti izvora rijeke Rude mjenjenih na postajama Ruda 1 i Ribnjak te dnevnih mjerenja količina palih na kišomjerne stanice Udovičić, Ruda-Rosandići i Gljev.

Tablica 5.2. Kroskorelacija izdašnosti i količina oborina, izvor rijeke Rude

k (dan)	$r_{xy}(k)$	k (dan)	$r_{xy}(k)$
0	0,368	0	0,368
1	0,406	-1	0,161
2	0,331	-2	0,097
3	0,269	-3	0,083
4	0,223	-4	0,074
5	0,196	-5	0,067
6	0,178	-6	0,055
7	0,159	-7	0,054
8	0,140	-8	0,069
9	0,143	-9	0,089
10	0,154	-10	0,072
11	0,162	-11	0,046
12	0,157	-12	0,021
13	0,141	-13	0,016
14	0,123	-14	0,018
15	0,112	-15	0,028
16	0,111	-16	0,019
17	0,108	-17	0,017
18	0,097	-18	0,022
19	0,105	-19	0,020
20	0,111	-20	0,000
21	0,115	-21	0,008
22	0,109	-22	0,013
23	0,095	-23	-0,005
24	0,084	-24	-0,006
25	0,082	-25	-0,002
26	0,079	-26	-0,004
27	0,081	-27	-0,001
28	0,072	-28	0,003
29	0,068	-29	0,019
30	0,061	-30	0,018

Na slici 5.6. prikazani su kroskorelogrami za sušna i kišna razdoblja koja su određena na temelju analize dnevnog i mjesečnog hoda oborina i protoka (Slike 4.11. i 4.12.). Za sušna razdoblja uzet je period od 1. travnja. do 30. rujna., a za vlažna od 1. listopada do 30. ožujka.



Slika 5.6. Autokorelogrami sušnih i vlažnih razdoblja.

Na prvi pogled, uočljiva je razlika u maksimalnim vrijednostima kroskorelacijske funkcije između sušnijeg i vlažnijeg razdoblja. Vlažnija razdoblja pokazuju očekivano veće vrijednosti kroskorelacijske funkcije i sporija opadanja od maksimalne vrijednosti.

Maksimalne vrijednosti kroskorelacijske funkcije su za oba razdoblja pri vremenima odmaka od jednog dana.

Zanimljiv oblik kroskorelacijske funkcije dobiven je za sušnije razdoblje u 2014. godini. Uočljivo je periodično ponavljanje maksimalne vrijednosti funkcije pri prvom, 11. i 22. danu. Ulazni signal oborine uzrokuje maksimum i sljedeće lokalne maksimume u gotovo pravilnim razmacima od 10-ak dana. Ovu pojavu bi se moglo objasniti činjenicom da se dogodila u sušnijem razdoblju, kada je razina podzemne vode niža, a autokorelacijskom funkcijom (Slika 5.4.) i kroskorelacijskom funkcijom (Slika 5.5.) je već pokazano da pri nižim vrijednostima podzemne vode je izraženije retencijsko djelovanje podzemlja.

6. Zaključak

Korelacijom dnevnih, mjesečnih i godišnjih podataka protoka i oborina dobivena je različita snaga korelacije koja ide od slabe (0,395) kod dnevnih, do jake (0,812) kod godišnjih podataka. Analizom podataka korelacije naslućuje se zakašnjenje između oborina i protoka različito od nule, a što je potvrđeno kroskorelacijskom analizom. Kroskorelacija podataka protoka i oborina na slivu rijeke Rude može biti korisna za utvrđivanje jačine povezanosti ta dva parametra. Rezultati kroskorelacije u skladu su s očekivanim s obzirom na geološku građu terena koja se sastoji uglavnom od čistih dobro uslojenih vapnenaca ili vapnenaca s manjim lećama slabije topivih stijena poput dolomita. Sve to ukazuje na raznolika retencijska svojstva.

Autokorelacijskom analizom dobiven je efekt memorije od 89 dana, što je relativno dug period s obzirom na krški teren. Zadržavanje vode u podzemlju pri visokim razinama podzemne vode (vlažnije razdoblje u godini) je relativno kratko (do 10-ak dana) jer je područje sliva u visokom stupnju okršenosti što za posljedicu ima veću efektivnu poroznost. Pri nižim razinama podzemne vode (sušnije razdoblje u godini) utjecaja oborine na istjecanje na izvoru više nema jer je vrijednost kroskorelacijske funkcije nakon 10. dana ispod 0,2. Retencijsko djelovanje podzemlja pri niskim razinama podzemne vode (sušnija razdoblja u godini) omogućuje stalno istjecanje vode na izvoru stoga izvor nikada ne presušuje. Analizom kroskorelograma sušnijih i vlažnijih razdoblja uočljiva je razlika maksimalnih vrijednosti kroskorelacije, gdje vlažnija razdoblja pokazuju očekivano veće vrijednosti kroskorelacijske funkcije i sporija opadanja od maksimalne vrijednosti.

7. Literatura

BAČANI, A. (2006): *Hidrogeologija I*. Rudarsko-geološko-naftni fakultet. Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 198 str.

BANOVIĆ, M. (2014): *Određivanje glavne krivulje recesije izvora Rude*. Diplomski rad. Fakultet građevinarstva arhitekture i geodezije. Sveučilište u Splitu, Split

BARAKA, A. (2015): *Raznolikost i struktura zajednice puževa (Mollusca, Gastropoda) izvorišnog dijela rijeke Cetine*. Diplomski rad. Prirodoslovno-matematički fakultet. Sveučilište u Zagrebu, Zagreb 2015.

LIČINA, I. i LISJAK, D. (2014): *Primjena statističkih metoda s naglaskom na trend, korelaciju i regresiju*. Seminarski rad, Ekonomski fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Osijek.

MAGDALENIĆ, A. (1970): *Hidrogeologija sliva Cetine*. Disertacija. Rudarsko-geološko-naftni fakultet. Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.

MUSY, A. i HIGY, C. (2011): *Hydrology – A Science of Nature*. Taylor and Francis Group, SAD, Boca Raton, 346 str.

PARLOV, J. *Hidrogeologija krša*, skripta za akademsku godinu 2017/2018

POSAVEC, K., VUKOJEVIĆ, P., RATKAJ, M. I BEDENIKOVIĆ, T. (2017): *Kroskorelacijsko modeliranje interakcije površinskih i podzemnih voda primjenom aplikacije Excel*. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 32(1), str. 32-32. doi: <https://doi.org/10.17794/rgn.2017.1.4>

RAIĆ, V., PEPEŠ, J., SIKIRICA I MAGAŠ, N. (1982): *Tumač osnovne geološke karte 1:100.000 za list Sinj K 33-10*. Geoinžinjering institut za geologiju Sarajevo i Geološki zavod, OOUR za geologiju i peletonologiju Zagreb.

ŽUGAJ, R. (2015): *Hidrologija*. Rudarsko-geološko-naftni fakultet. Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 538 str.

<http://springstewardshipinstitute.org/> pristupljeno 16.06.2019.