

# Identifikacija hidrološkog režima i analiza utjecaja klimatskih promjena na dinamiku krškog vodonosnika šireg obuhvata Imotskog polja

---

Vrsalović, Adrijana

Doctoral thesis / Doktorski rad

2025

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:*

**University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije**

<https://doi.org/10.31534/DocT.060.VrsA>

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:470691>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-10**



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)





**SVEUČILIŠTE U SPLITU**

**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE  
I GEODEZIJE**

**Adrijana Vrsalović, mag.ing.aedif.**

**IDENTIFIKACIJA HIDROLOŠKOG  
REŽIMA I ANALIZA UTJECAJA  
KLIMATSKIH PROMJENA NA  
DINAMIKU KRŠKOG VODONOSNIKA  
ŠIREG OBUHVATA IMOTSKOG POLJA**

**Disertacija**

**Split, 2025.**

Adrijana Vrsalović, mag.ing.aedif.

Redni broj: 060

**Ova disertacija predana je na ocjenu  
Sveučilištu u Splitu,  
Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije  
u svrhu stjecanja akademskog stupnja  
doktora tehničkih znanosti u  
znanstvenom polju građevinarstvo**

**Mentor:** izv. prof. dr. sc. Ivo Andrić

**Povjerenstvo za ocjenu:**

prof. dr. sc. Roko Andričević

prof. dr. sc. Hrvoje Gotovac

prof. dr. sc. Lidija Tadić

izv. prof. dr. sc. Igor Ružić

izv. prof. dr. sc. Bojan Đurin

**Povjerenstvo za obranu:**

prof. dr. sc. Roko Andričević

prof. dr. sc. Hrvoje Gotovac

prof. dr. sc. Lidija Tadić

izv. prof. dr. sc. Igor Ružić

izv. prof. dr. sc. Bojan Đurin

Rad je obranjen dana 09. siječnja 2025.

Tajnica:

Saša Delić, dipl. iur.

**Rad sadrži:**

146 stranica teksta

65 slika

27 tablica

176 citiranih referenci

*Zahvala:*

*Na prvom mjestu, iskrena zahvala mentoru, izv. prof. dr. sc. Ivi Andriću na velikoj pomoći, podršci i razumijevanju. Njegova stručnost, strpljenje i ohrabrenje bili su ključni u svakom koraku ovog istraživanja. Zahvaljujem i prof. emer. dr. sc. Ognjenu Bonacciju na pruženim prilikama za rad na znanstvenim radovima te na spremnosti da podijeli svoje bogato znanje i iskustvo, što je značajno doprinijelo mom profesionalnom razvoju i napretku u istraživačkom radu.*

*Također želim zahvaliti svojoj obitelji na neizmjerne podršci i razumijevanju tijekom svih godina studija, a posebne zahvale idu noni Antici koja je usprkos poznim godinama uvijek bila tu za saslušati i pomoći. Hvala i mome dragom Tinu bez čije potpore i ohrabrenja ovo sve ne bi bilo moguće.*

*Na kraju moram spomenuti i Anu, Mariju i Suzanu koje su bile neizmjerne podrška u svakome trenutku.*

UDK 556:551.435.8:551.588](497.5-37 Imotski)(043.3)  
556.5(497.5)(285 Crveno jezero)(043.3)  
556.3(497.5)(282.03 Opačac)(043.3)

Adrijana Vrsalović, mag.ing.aedif.

## **Identifikacija hidrološkog režima i analiza utjecaja klimatskih promjena na dinamiku krškog vodonosnika šireg obuhvata Imotskog polja**

### **Sažetak:**

Krška područja su kompleksni hidrološki i hidrogeološki sustavi s heterogenim krškim formacijama koje uzrokuju varijabilne i nepredvidive tokove vode. Istraživanje hidroloških procesa ključno je za razumijevanje dinamike vodonosnika i međusobnih interakcija između jedinstvenih krških fenomena u Imotskom polju, s fokusom na zaštitu krškog vodonosnika i krških morfoloških oblika. Identifikacija dinamičkih procesa u hidrološkom režimu u kontekstu klimatskih promjena provedena je analizom podataka s postojećih i novopostavljenih klimatoloških i hidroloških postaja. Detekcija trendova i ekstremnih pojava u ovom istraživanju ključna je za procjenu utjecaja klimatskih promjena na regionalni tok vode i dostupnost vodnih resursa u kršu. Po prvi puta napravljena je sveobuhvatna analiza hidroloških parametara u svim vodnim tijelima istovremeno, pružajući uvid u njihove hidrološke i hidrogeološke karakteristike i međusobne odnose. Analizom je potvrđena podudarnost intervala vršnih vrijednosti te slični hidrološki odgovori vodnih tijela na oborine, što ih klasificira u isti krški vodonosnik. Nadalje, izvršena je primjena recesijske analize na podacima u Crvenom jezeru pritom uvodeći novu terminologiju kvazirecesijskih krivulja kako bi se istaknula prilagodba i primjena na jezerskom okruženju. Kvazirecesijskim krivuljama određen je prevladavajući mehanizam punjenja i pražnjenja jezera te su detektirane promjene koje ukazuju na moguću povezanost jezera s izvorom Opačac. Prezentirani su i hidrološki modeli izvora Opačac te izvora Opačac s Crvenim jezerom primjenom konceptualnog modela KARSTMOD. Uz modeliranje izvora, izvršeno je i modeliranje šireg područja Imotskog polja primjenom integralnog modela MIKE SHE.

**Ključne riječi:** hidrologija krša, kvazirecesijske krivulje, Imotska jezera, hidrološki modeli

UDC 556:551.435.8:551.588](497.5-37 Imotski)(043.3)  
556.5(497.5)(285 Crveno jezero)(043.3)  
556.3(497.5)(282.03 Opačac)(043.3)

Adrijana Vrsalović, mag.ing.aedif.

## **Hydrological regime identification and analysis of the climate change impact on dynamics of karst aquifer in the wider area of Imotsko polje**

### **Abstract:**

Karst areas are complex hydrological systems with heterogeneous karst formations that cause variable and unpredictable water flows. The study of hydrological functioning is crucial for understanding the dynamics of the aquifer and the mutual interactions between the unique karst phenomena in Imotsko polje, with a focus on protecting of the karst aquifer and morphological karst forms. Identifying dynamic processes in the hydrological regime in the context of climate change was carried out by analyzing data from existing and newly installed climatological and hydrological stations. Identifying trends and extreme phenomena in this study is essential for assessing the impact of climate change on regional water flow and the availability of water resources in karst areas. For the first time, a comprehensive analysis of hydrological parameters in all water bodies was carried out simultaneously, providing insights into their hydrological characteristics and interrelationships. The analysis confirmed the coincidence of peak value intervals and similar hydrological responses of the water bodies to precipitation, assigning them to the same karst aquifer. In addition, the recession analysis was applied to the Red Lake data, introducing the new terminology of quasi-recession curves to emphasize the adaptation and application to the lake environment. Quasi-recession curves were used to determine the primary mechanism of filling and emptying the lake, revealing changes that indicate a possible connection between the lake and the Opačac spring. Hydrological models of the Opačac spring and the Opačac spring with the Red Lake were developed using the KARSTMOD conceptual model. In addition to modeling the spring, the wider Imotsko polje area was simulated using the MIKE SHE integral model.

**Keywords:** Karst hydrology, Quasi-recession curves, Imotski lakes, Hydrological models



# SADRŽAJ

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1.     | UVOD .....   | 1  |
| 1.1.   | Karakteristike krškog reljefa i krških vodonosnika .....           | 1  |
| 1.1.1. | Definicija i karakteristike krša .....                             | 1  |
| 1.1.2. | Koncept krškog vodonosnika .....                                   | 3  |
| 1.1.3. | Ranjivost i održivost krških vodnih resursa .....                  | 5  |
| 2.     | PREGLED PODRUČJA ISTRAŽIVANJA I CILJEVI DOKTORSKE DISERTACIJE..... | 7  |
| 2.1.   | Pregled područja istraživanja.....                                 | 7  |
| 2.1.1. | Osnovne karakteristike područja .....                              | 7  |
| 2.1.2. | Hidrološke i hidrogeološke značajke područja .....                 | 9  |
| 2.1.3. | Postojeće spoznaje u istraživačkom području .....                  | 15 |
| 2.2.   | Motivacija i svrha rada .....                                      | 21 |
| 2.3.   | Ciljevi i hipoteze istraživanja .....                              | 22 |
| 2.4.   | Znanstveni doprinos .....  | 23 |
| 3.     | METODOLOGIJA.....  | 25 |
| 3.1.   | Statističke metode.....  | 25 |
| 3.1.1. | Homogenost podataka .....  | 25 |
| 3.1.2. | Analiza trendova .....   | 26 |
| 3.1.3. | Analiza oborina .....  | 27 |
| 3.1.4. | Kvazirecesijske krivulje .....                                     | 29 |
| 3.1.5. | Korelacija i spektralna analiza .....                              | 32 |
| 3.1.6. | Umjetne neuronske mreže .....                                      | 36 |
| 3.2.   | Hidrološke metode.....   | 38 |
| 3.2.1. | Proračun referentne evapotranspiracije.....                        | 38 |
| 3.2.2. | Modeliranje u kršu i vrste modela.....                             | 40 |
| 3.3.   | Sustavi monitoringa .....  | 45 |
| 4.     | KLIMATOLOŠKA I HIDROLOŠKA ANALIZA .....                            | 49 |
| 4.1.   | Klimatološka analiza .....   | 49 |
| 4.1.1. | Analiza temperature zraka.....                                     | 50 |
| 4.1.2. | Analiza oborina .....  | 54 |
| 4.2.   | Hidrološka analiza .....   | 64 |
| 4.2.1. | Analiza po mjernim postajama.....                                  | 65 |
| 4.3.   | Identifikacija hidroloških procesa u krškom vodonosniku.....       | 76 |
| 4.3.1. | Analiza dinamike Crvenog jezera i perioda recesije .....           | 77 |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 4.3.2. | Analiza u vremenskoj i frekvencijskoj domeni.....                              | 80  |
| 4.4.   | Istraživački monitoring vodnih tijela.....                                     | 84  |
| 4.5.   | Sažetak rezultata istraživanja.....  | 91  |
| 5.     | MODELIRANJE HIDRODINAMIKE KRŠKOG VODONOSNIKA .....                             | 95  |
| 5.1.   | Izrada modela u KARSTMOD-u.....  | 95  |
| 5.2.   | Izrada modela u MIKE SHE-u .....   | 103 |
| 5.3.   | Predviđanje protoka na izvoru Opačac u razdoblju od 2022. do 2060. godine..... | 115 |
| 6.     | ZAKLJUČCI I SMJERNICE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA .....                            | 120 |
| 6.1.   | Zaključci .....  | 120 |
| 6.2.   | Smjernice za daljnja istraživanja .....  | 124 |
| 7.     | LITERATURA.....  | 125 |

## 1. UVOD

### 1.1. Karakteristike krškog reljefa i krških vodonosnika

#### 1.1.1. Definicija i karakteristike krša

Krš je specifičan tip reljefa koji se odlikuje karakterističnim oblicima te površinskom i podzemnom hidrografskom mrežom, a nastaje procesom okršavanja odnosno agresivnim djelovanjem vode na topljive temeljne stijene poput vapnenca, dolomita, krede i gipsa (Jennings, 1971; Bonacci, 1987; Ford & Williams, 1989).

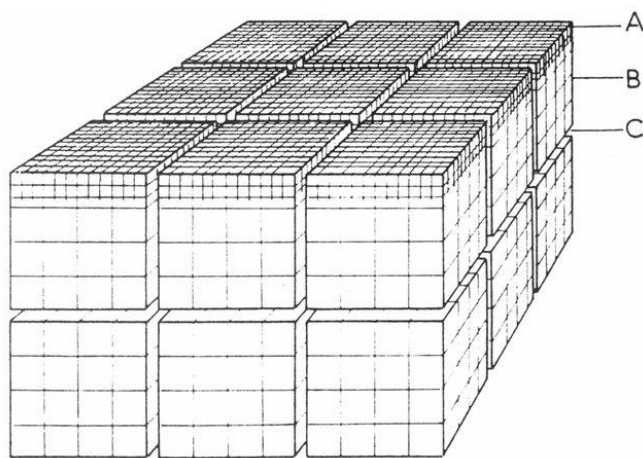
Proces okršavanja odvija se uz prisutnost ugljikovog dioksida ( $\text{CO}_2$ ) i otapala poput kišnice i drugih površinskih voda koje se infiltriraju u podzemlje. Prisutnost  $\text{CO}_2$  omogućuje stvaranje karbonatne kiseline koja otapa stijensku masu bogatu kalcijevim karbonatom. Količina  $\text{CO}_2$  u tlu smanjuje se s dubinom, što smanjuje intenzitet procesa okršavanja u dubljim slojevima stijene. U isto vrijeme, gornji slojevi, gdje je koncentracija  $\text{CO}_2$  veća zbog aktivnosti mikroorganizama i prisutnosti humusa, podložniji su intenzivnijem okršavanju, posljedica čega je izraženija ispucanost stijena i stvaranje krških oblika (Bonacci, 1987). Osim  $\text{CO}_2$ , na jačinu topljivosti stijena značajan utjecaj ima i temperatura, kemijski sastav i brzina vode, količina oborina, klimatski uvjeti te sastav stijene (Ford & Williams, 1989). Na ovaj način, krški reljef se vremenom mijenja, povećavajući udio pukotina te stvarajući krajolik sa specifičnim površinskim i podzemnim značajkama. Zbog neprestanog procesa okršavanja, moguć je nastanak neočekivanih tokova podzemne vode s novim točkama izviranja (Goldscheider & Drew, 2007).

Procesom okršavanja nastaju i krški reljefni oblici koji obuhvaćaju nadzemne krške oblike – škrape, ponikve, krška polja i uvale te podzemne krške oblike – jame i špilje. Škrape su mikrokrški reljefni oblici, nepravilna žljebasta udubljenja na vapnencima međusobno odijeljena oštrim bridovima i izdužena u smjeru otjecanja vode (Curić & Curić, 1999). Područja prekrivena škrapama najčešće se nalaze na rubovima polja u kršu i najočitiji su prikaz krških procesa (Bonacci, 1987). Ponikve se definiraju kao ljevkaste, tanjuraste ili bunaraste zatvorene krške udoline nastale uslijed procesa erozije i mehaničkog djelovanja vode (Bonacci, 2006). Pojavljuju se najčešće u grupama, često koncentrirane uz linije rasjeda (Bonacci, 1987). Polja su velika, ravna, zatvorena udubljenja u kršu koja predstavljaju podsustav šireg krškog sustava (Ford & Williams, 1989), dok krške uvale predstavljaju izdužene udubine u čijem se dnu nalaze udoline, jame i špilje (Bonacci, 1987). Jama se kao podzemni krški reljefni oblik definira kao duboka, pretežno okomita, prirodna šupljina najčešće manjeg promjera u krškom masivu, dok je špilja prirodna podzemna ili podvodna šupljina (ili sustav šupljina) razvijena pretežito u vodoravnom smjeru (Curić & Curić, 1999).

Osnovne hidrogeološke karakteristike krša su anizotropnost i heterogenost. Anizotropnost podrazumijeva različita svojstva u različitim smjerovima, dok heterogenost podrazumijeva varijaciju svojstava od mjesta do mjesta unutar iste formacije (Bonacci, 1987; Ford & Williams, 1989). Anizotropnost i heterogenost tako uvjetuju različita hidrogeološka svojstva vodonosnika, od niske hidrauličke provodljivosti i velikog kapaciteta skladištenja u mikroporama i porama, do visoke hidrauličke provodljivosti i manjeg kapaciteta skladištenja u makroporama i provodnicima (Bonacci, 1987; Goldscheider & Drew, 2007; Stevanović, 2015). Pojava prostornog rasporeda zona različite propusnosti i različitog kapaciteta je slučajna i nepravilna što otežava predviđanje smjerova i brzina tokova u kompleksnoj krškoj strukturi. Specifično hidrološko djelovanje površinske i podzemne hidrografske mreže otežava i određivanje točnih granica slivova s obzirom da zbog složenosti podzemnih sustava voda infiltrirana na jednom mjestu može biti lako transportirana i na drugom, obližnjem slivu. Pojava površinske hidrografske mreže rjeđa je pojava u krškim terenima zbog izraženih procesa infiltracije i perkolacije koji uz jaku okršenost terena uzrokuju poniranje vode s površine terena ka dubljim slojevima (Bonacci, 1987; Ford & Williams, 1989).

### 1.1.2. Koncept krškog vodonosnika

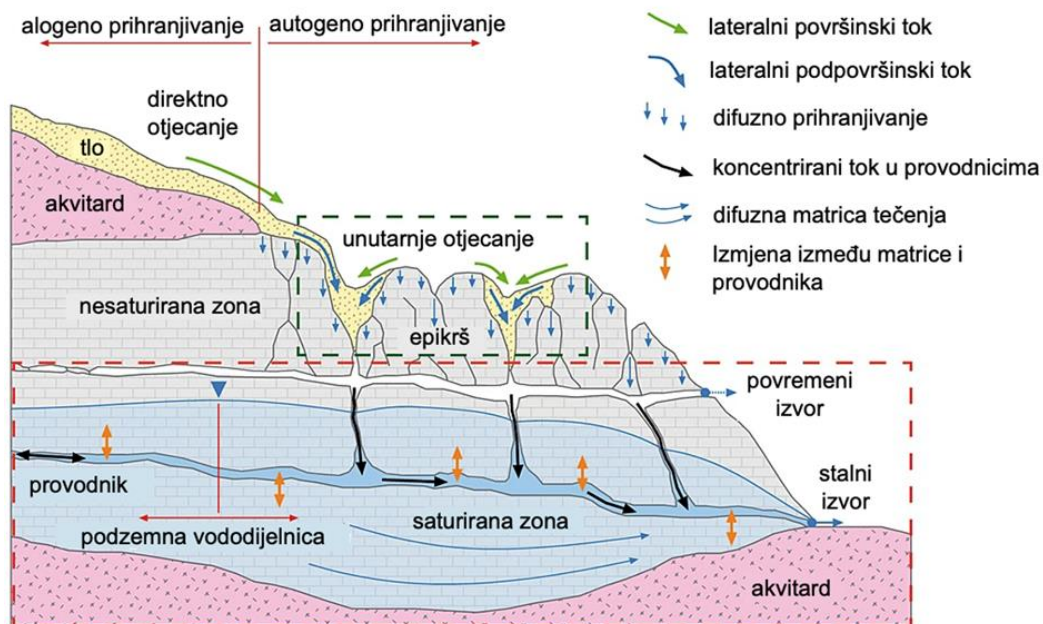
Vodonosnik predstavlja geološku formaciju koja ima sposobnost prikupljanja, skladištenja i ispuštanja vode (Freeze & Cherry, 1979; Bonacci, 1987; Ford & Williams, 1989; Bonacci & Roje-Bonacci, 2004; Stevanović, 2015). S obzirom na kompleksnost krške sredine uslijed anizotropnosti i litološke nehomogenosti, krški vodonosnik se može definirati kao visoko propusna mreža provodnika uronjena u slabo propusnu kršku matricu (Király i ostali, 1995; Goldscheider & Drew, 2007). Ovakav konceptualni model strukture krškog vodonosnika (Slika 1.1) definira vodonosnik kao trokomponentni sustav. Prvu komponentu (A) čini jako raspucana zona krša ili epikrš kroz koju se odvija infiltracija vode i u kojem je u nekim slučajevima moguće zadržavanje značajnijih količina voda uslijed prisutnosti nepropusnih tala (Ford & Williams, 1989). Drugu komponentu (B) sustava čini krška matrica sastavljena od blokova raščlanjenih pukotinama niske propusnosti, u kojima se odvija sporo (laminarno) strujanje podzemne vode i unutar kojih se akumulira najveća količina vode. Treću komponentu (C) sustava čine krški provodnici, kanali visoke propusnosti koji odvajaju blokove niske propusnosti, u kojima se odvija brzi (turbulentni) tok podzemne vode.



**Slika 1.1** Konceptualni model strukture krškog vodonosnika (Drogue, 1980)

S obzirom na različite veličine šupljina, od submikroskopskih do kaverni promjera i nekoliko desetaka metara (Bonacci & Roje-Bonacci, 2004), u krškim sustavima razlikuju se tri razine poroznosti: primarna, sekundarna i tercijarna (Ford & Williams, 1989; White, 2003). Primarna poroznost obuhvaća međuzrnatu šupljine i mikropore nastale tijekom dijageneze karbonatnih stijena, koje malo pridonose cirkulaciji podzemne vode, ali imaju značajnu ulogu pri skladištenju vode (Ford & Williams, 1989; Hartmann, Goldscheider, i ostali, 2014). Sekundarna poroznost posljedica je prisustva malih pukotina i prslina nastalih tijekom tektonskih procesa

(Hartmann, Goldscheider, i ostali, 2014). Ove šupljine omogućavaju dreniranje vode između šupljina primarne poroznosti i tercijarne poroznosti te zajedno sa šupljinama primarne poroznosti ispunjavaju kršku matricu. Tercijarna poroznost obuhvaća šupljine većih dimenzija tzv. krške provodnike nastale procesom okršavanja. Krški provodnici značajni su za protok vode, osobito u razdoblju intenzivnih oborina. Uloga krških provodnika u skladištenju vode, u usporedbi s krškom matricom, je zanemariva (Bonacci & Roje-Bonacci, 2004; Goldscheider & Drew, 2007).



**Slika 1.2** Konceptualni model krškog vodonosnika (Hartmann, Goldscheider, i ostali, 2014)

Hidrološko funkcioniranje krškog sustava kao posljedica specifične strukture krškog vodonosnika ukazuje na: dvojnost procesa infiltracije (sporo, difuzno otjecanje u krškoj matrici i brzo tečenje u krškim provodnicima), dvojnost brzina tečenja (mala brzine tečenja u krškoj matrici i velike brzine tečenja u krškim provodnicima) i dvojnost uvjeta tečenja (difuzni tok kroz kršku matricu tijekom sušnog razdoblja te koncentrirani i vremenski promjenjiv tok kroz krške provodnike tijekom intenzivnih oborina) (Király i ostali, 1995; Hartmann, Goldscheider, i ostali, 2014). Funkcioniranje krškog sustava temeljem općeg konceptualnog modela za krške vodonosnike (White, 2003) prikazano je na slici 1.2 (Hartmann, Goldscheider, i ostali, 2014). Prihranjivanje vodonosnika odvija se alogeno – podzemnim i površinskim putem iz susjednih slivova i daljih predjela, uključujući i nekrška područja, te autogeno – prihranjivanje difuznom infiltracijom i unutarnjim otjecanjem unutar krškog područja (Goldscheider & Drew, 2007; Hartmann, Goldscheider, i ostali, 2014). Opisana dvojnost procesa prihranjivanja specifičnost je krških vodonosnika zbog koje se pri procjeni ranjivosti podzemnih voda i rješavanju pitanja zaštite istih ne smije zanemariti utjecaj alogenog dijela slivnog područja. Što se tiče cirkulacije vode u

krškom vodonosniku, vertikalna cirkulacija koja uključuje procese infiltracije i perkolacije pretežito se odvija u nesaturiranoj zoni koja završava razinom podzemne vode, dok je horizontalna cirkulacija dominantna u saturiranoj zoni (Cvijic, 1918; Bonacci, 1987; Ford & Williams, 1989). Koncentrirani tok u krškim provodnicima uzrokuje pojavu izviranja podzemne vode na površinu, odnosno formiranje stalnih izvora, dok je pojava povremenih izvora pak rezultat prekoračenja kapaciteta krških provodnika.

### 1.1.3. Ranjivost i održivost krških vodnih resursa

Krški vodni resursi zbog svojih karakterističnih obilježja zahtijevaju specifičan pristup u upravljanju i zaštiti. Jedinstvena topografija te specifične hidrološke i hidrogeološke značajke krša čine ga osjetljivim na promjene u prostornoj i vremenskoj preraspodjeli vode, kao i na vanjske čimbenike, najčešće uzrokovane antropogenim aktivnostima koje stvaraju potencijalne onečišćivače. Takva onečišćenja mogu značajno utjecati na kvalitetu podzemnih voda, a zbog specifičnosti krša, posljedice mogu biti vidljive i na udaljenim lokacijama od izvora onečišćenja.

Ranjivost krša prvenstveno proizlazi iz visoke propusnosti krškog vodonosnika, koja je rezultat prisutnosti razgranatog sustava pukotina, šupljina, kanala i provodnika, uz nedostatak učinkovitih mehanizama za filtriranje polutanata (Leibundgut, 1998). Stupanj ranjivosti ovisi o karakteristikama krškog sustava – prisutnosti ili odsutnosti tla iznad stijenske mase, infiltracijskim svojstvima, intenzitetu okršnosti krške matrice te razvijenosti krškog sustava (Quinlan i ostali, 1991). Prisustvo tla iznad stijenske mase omogućava razgradnju polutanata mikroorganizmima te fizikalnim i kemijskim procesima prije njihovog prodiranja u podzemlje (Leibundgut, 1998). Krški sustavi Dinarskog krša najčešće imaju vrlo tanak sloj tla iznad osnovne stijenske mase, što rezultira slabom razgradnjom polutanata. Nedostatak tla iznad stijenske mase omogućava brži prodor polutanata iz nesaturirane u saturiranu zonu. Time nesaturirana zona gubi svoju funkciju filtracije, dok se u saturiranoj zoni odvijaju procesi advekcije i molekularne difuzije, koji, zbog kraćeg zadržavanja vode u podzemlju, nisu dovoljni za razgradnju polutanata (Leibundgut, 1998). Infiltracijske karakteristike manifestiraju se kroz procese autogenog i alogenog prihranjivanja krškog vodonosnika. Mjesta koncentriranog autogenog toka vode, karakteristična za vrtače i ponikve, predstavljaju najranjivije točke krša zbog izravne veze s krškim vodonosnikom (Leibundgut, 1998).

Osim onečišćenja, na kvalitetu i količinu raspoloživih vodnih resursa drastičan utjecaj mogu imati i prirodne katastrofe ali i prekomjerna eksploatacija prirodnih resursa (vode). Između ostalog, heterogenost krških vodonosnika podrazumijeva fluktuacije u dostupnosti vode što

dodatno otežava upravljanje krškim vodnim resursima. Održivo upravljanje vodnim resursima podrazumijeva osiguranje održivosti vodoopskrbe na način da zadovoljava potrebe trenutnih naraštaja ne ugrožavajući pritom izgled budućih naraštaja (Simon, 1987), zaštitu ekosustava i promicanje društveno-ekonomskog razvoja. Zaštita ekosustava zahtjeva minimiziranje antropogenih utjecaja unutar ranjivih krških sustava, dok promicanje društvenog-ekonomskog razvoja obuhvaća niz strategija i praksi koje imaju za cilj unapređenje kvalitete života zajednica i poticanje ekonomskog napretka, dok istovremeno osigurava očuvanje ekosustava i dugoročnu održivost vodnih resursa.



## 2. PREGLED PODRUČJA ISTRAŽIVANJA I CILJEVI DOKTORSKE DISERTACIJE

### 2.1. Pregled područja istraživanja

#### 2.1.1. Osnovne karakteristike područja

Imotsko polje primjer je karakterističnog polja u kršu, definiranog prema LeGrandu (1983) kao ravna aluvijalna dolina sa stalnim ili povremenim izvorima okružena relativno strmim golim vapnenačkim grebenima. Smješteno je na sjeveroistočnom dijelu kontinentalnog područja Splitsko-dalmatinske županije. Rasprostire se na površini od 95 km<sup>2</sup>, od čega je 44 km<sup>2</sup> na teritoriju Republike Hrvatske, a ostatak na teritoriju Bosne i Hercegovine (Ljubenkov, 2015). Ukupna duljina polja je 33,3 km, od toga 17,5 km na hrvatskom teritoriju sa širinom polja u rasponu od 1 km između Glavine Donje i Kamenmosta do 4,5 km između Vinjana Donjih i Runovića. Linija Glavina Donja – Kamenmost, najužeg dijela polja, dijeli polje na dva dijela: sjeverozapadni dio različitog litološkog sastava te jugozapadni dio jednoličnog litološkog sastava (Bojanić i ostali, 1981; Slišković & Ivičić, 2001).

Polje ima naglašeno dinarsko pružanje u smjeru sjeverozapad-jugoistok sa strmijim i višim rubnim dijelovima sjeveroistočnog i sjeverozapadnog dijela, te je blago nagnuto od sjeveroistoka prema jugozapadu i od sjeverozapada prema jugoistoku što proizlazi i iz položaja hidrografske mreže (Bojanić i ostali, 1981). Polje, nadmorske visine od 253-270 m, podsustav je šireg krškog

masiva odgovornog za površinsko i podzemno kretanje vode, a gledajući hipsometrijski jedno je od niza polja, zajedno s višim uzvodnim poljima poput Duvanjskog, Livanjskog i Posušskog polja, te nižim nizvodnim poljima kao što su Ljubuško polje, Rastok i Vrgorsko polje (Herak & Stringfield, 1972; Bojanić i ostali, 1981; Biondić & Biondić, 2014; Ljubenković, 2015; Zdilar, 2015; Ljubenković & Glavaš, 2017).



*Slika 2.1* Prološko blato i Galipovac s pogledom na Imotsko polje (foto: Branimir Jukić)

Klima područja Imotskog polja je mediteranska s jakim utjecajem kontinentalne klime. Prema Köppen-Geiger (Šegota & Filipčić, 2003) klimatskoj klasifikaciji, pripada klasi Cfb, koju karakterizira umjereno toplo vlažna klima s toplim ljetom. U odnosu na tipičnu mediteransku klimu, temperature su niže i podložne većim varijacijama. Češća je pojava lokalnih vjetrova kao što su bura i jugo, uz povremenu pojavu ljetnih vjetrova sličnih maestralu i burinu na primorju. Geografski položaj Imotskog polja, smještenog između planine Biokovo i Dinarskog gorja, uzrokuje jedinstvene klimatske karakteristike koje obuhvaćaju velike oscilacije temperature tijekom dana i noći. U tom području često se javlja fenomen temperaturne inverzije, što rezultira značajnim temperaturnim razlikama između nižih dijelova polja i viših slojeva atmosfere, posebice noću i u ranim jutarnjim satima.

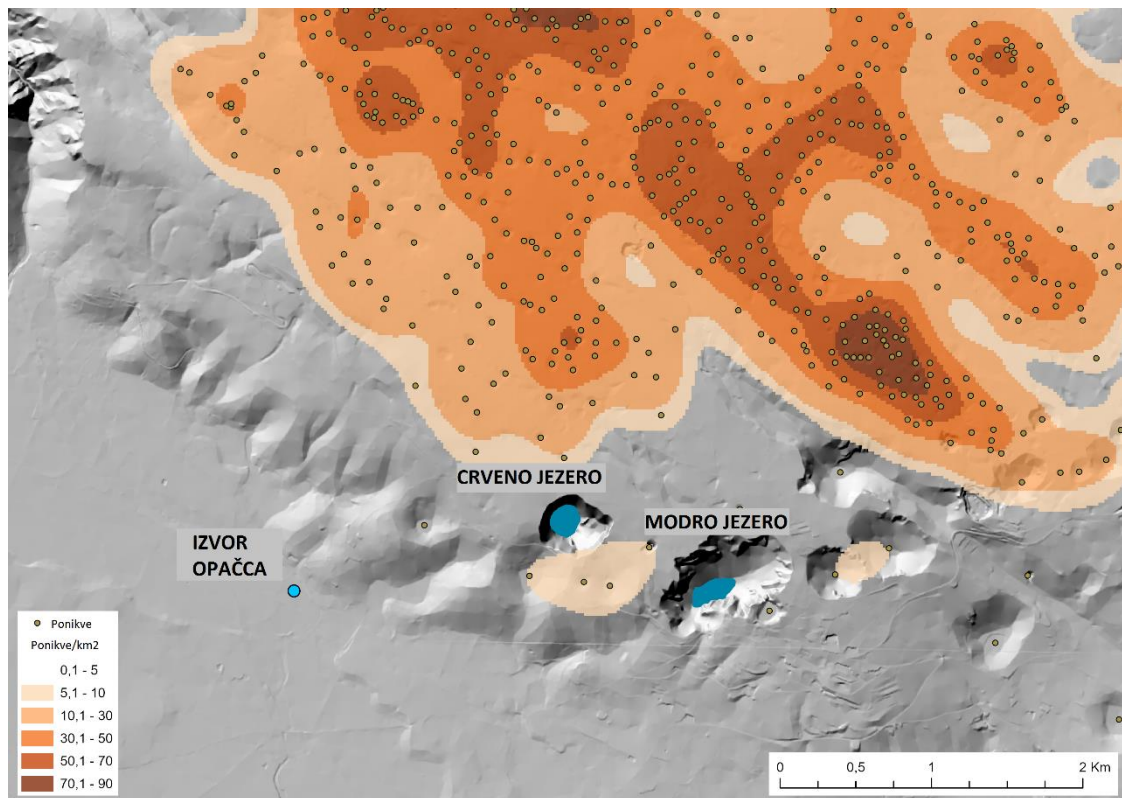
Prosječne godišnje temperature kreću se od 12 °C do 14 °C, dok je godišnji prosjek oborina 1500 mm (Bonacci & Roje-Bonacci, 2008; Bonacci & Andrić, 2014). Raspodjela oborina je sezonska s najvećom količinom oborina tijekom zimskih mjeseci, u listopadu i studenom te s minimumom oborina u srpnju i kolovozu. Sezonska raspodjela oborina osnovna je karakteristika maritimnog oborinskog režima.

Područje se odlikuje i jedinstvenim geološkim i geomorfološkim karakteristikama, među kojima se posebno ističu krški i fluviokrški reljefni oblici poput vrtača i speleoloških objekata, koncentriranih podzemnih tokova, te jezera koja često imaju sustav estavela. Ove specifične osobitosti područja rezultirale su uspostavom zaštićenih područja, uključujući prirodne spomenike kao što su Crveno i Modro jezero, značajni krajobraz Prološko blato i posebni rezervat Vrljike. Od rujna 2023. godine, ovo područje postalo je i dio geoparka Biokovo-Imotska jezera, pod zaštitom UNESCO-a (UNESCO, 2024). S obzirom na prisutnost jedinstvenih krških fenomena i specifičnu dinamiku podzemnih voda, nužno je posvetiti posebnu pozornost odgovornom i održivom upravljanju vodnim resursima te zaštitu krškog vodonosnika i krških morfoloških oblika.

### 2.1.2. Hidrološke i hidrogeološke značajke područja

Oblikovanje hidrografske mreže promatranog područja uvjetovano je erozijom, klimatskim uvjetima, tektonskom građom i litološkim sastavom, a rezultat utjecaja navedenih procesa je pojava brojnih egzokrških i endokrških reljefnih oblika (Zdilar, 2015). Brojnost krških morfoloških oblika najviše se očituje u gustoći ponikava, koje predstavljaju tipične krške depresije, suhe ili rijetko ispunjene vodom. Na ovom području evidentirano je čak 10.000 ponikava, pri čemu se najveća gustoća bilježi na području Prološke zaravni te sjeveroistočno od Imotskog (Slika 2.2), osobito u predjelu Rudina, gdje gustoća iznosi 70-90 ponikava/km<sup>2</sup> (Zdilar, 2015; Vrsalović i ostali, 2022). Učestalost pojave ponikvi, i ostalih krških morfoloških oblika ponegdje ukazuju na tektonski oslabljene zone (Slišković & Ivičić, 2001) koje utječu na složene hidrološke odnose promatranog područja.

Geološku građu čine pretežito propusne karbonatne stijene, poglavito vapnenci, na višem sjeveroistočnom platou, kvartarne naslage aluvija u polju te djelomično nepropusne stijene dolomita i dolomitnih vapnenaca južno od tokova Sije i Matice (Bojanić i ostali, 1981; Bonacci & Roje-Bonacci, 2000a; Zdilar, 2001; Vrsalović i ostali, 2022). Različita litološka građa uvjetovala je pojavu ponikava u dobro propusnim vapnencima uz sjeverozapadni i sjeveroistočni rubni dio polja, te ograničeniji razvoj krških pojava u jugozapadnom i jugoistočnom dijelu polja.



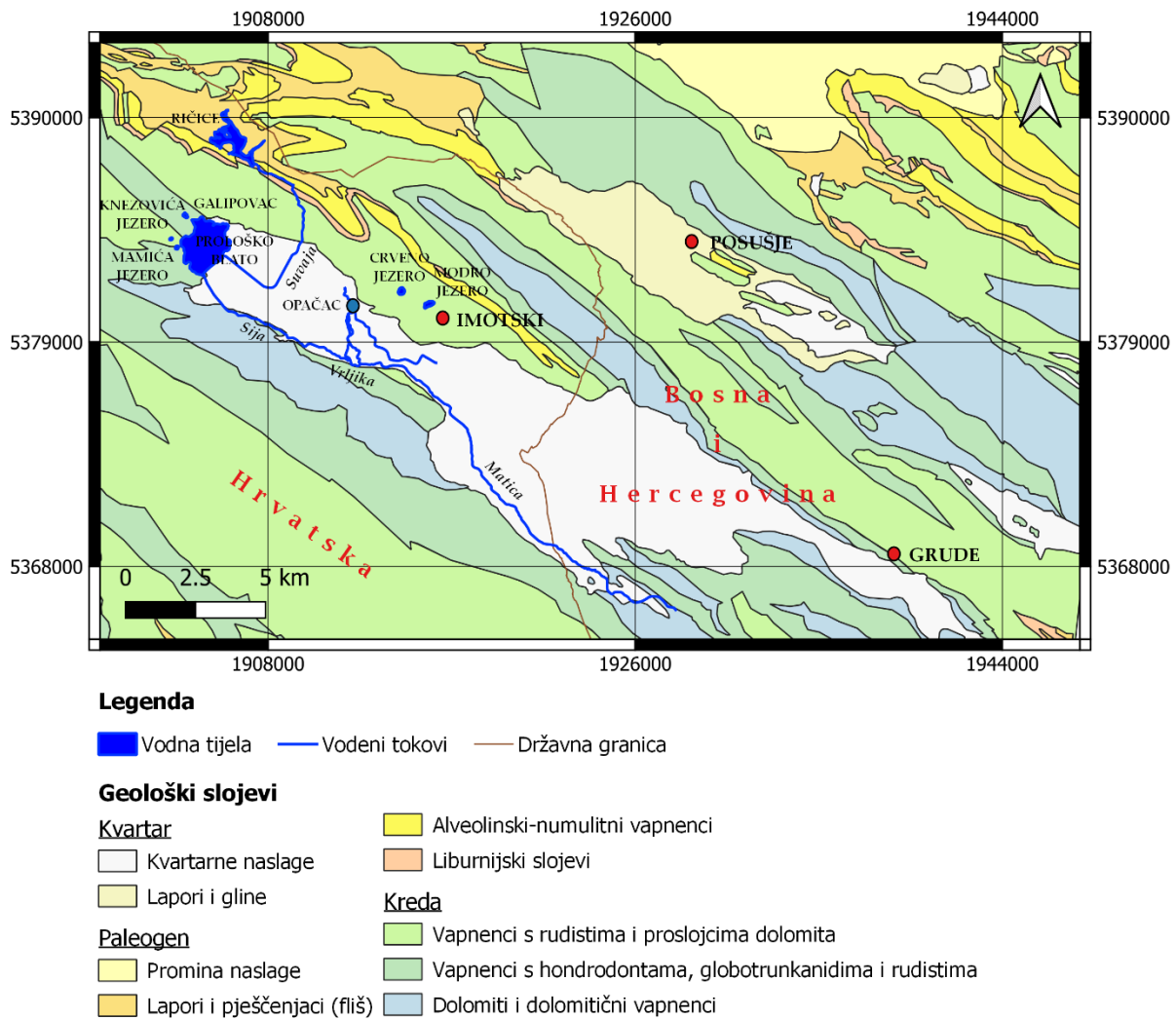
**Slika 2.2** Karta gustoće ponikava (broj ponikava po km<sup>2</sup>) za područje sjeveroistočno od grada Imotskog (Vrsalović i ostali, 2022)

Kvartarne naslage u većem dijelu polja predstavljaju barijeru tečenju voda iz karbonatnog područja sa sjevera i sjeveroistoka (Slišković & Ivičić, 2001) i iz viših hipsometrijskih područja putem kojih se vrši prihranjivanje vodonosnika šireg područja Imotskog polja. Osim toga imaju i važnu ulogu pri raspodjeli podzemnih voda, s obzirom da u pojedinim dijelovima polja predstavljaju i nepotpunu (viseću) barijeru tečenju zbog čega je moguće otjecanje podzemnih voda ispod i mimo barijere prema nižim predjelima, ali i prema moru u smjeru uvale Vrulje (Bojanić i ostali, 1981). Područja takvih karakteristika obuhvaćaju sjeverozapadni dio polja oko Prološkog blata, jugoistočni rubni dio polja te suženi dio između Donje Glavine i Kamenmosta.

Najznačajniji izvori, stalni ili povremeni, pojavljuju se uz sjeveroistočni rub polja, dok na jugozapadnom rubu nema stalnih izvora. Pojava povremenih izvora događa se za vrijeme visokih voda, kada se premašuju kapaciteti u krškom masivu, a kvartarni sedimenti nemaju dovoljnu propusnost da omoguće poniranje vode u podzemlje (Zdilar, 2015). Najznačajniji su izvori Vrljike, od kojih je najveći Opačac koji u sušnim razdobljima osigurava prosječni minimalni protok od 0,95 m<sup>3</sup>/s, prema podacima prikupljenim u razdoblju od 1995. do 2021. godine. Sifonski izvire i služi kao vodozahvat za područje grada Imotskog, općine Proložac, Podbablja, Zmijavaca, Runovića, Zagvozda, Lokvičića te dijelom općine Lovreć i Cista Provo (Plišić i ostali, 2009). Uz Opačac, izvori Vrljike su i Jauk, Utopišće, Jezerine i povremeni izvor Duboka draga.

Geološka građa ukazuje na izrazitu tektonsku aktivnost koja se odvijala tijekom geološke prošlosti i koja uz ostale geološke procese još uvijek traje. U prilog tome ide nastanak jezera Bučuša u jugozapadnom dijelu Prološkog blata 2004. godine urušavanjem terena kojem je prethodio potres i naknadnim zapunjavanjem ponikve vodom (Martinović, 2005). Litološki sastav ukazuje na to da različite stijene imaju različiti kapacitet infiltracije što uz druge negeološke čimbenike kao što su topografija terena, zemljani pokrov, vlažnost tla, vegetacija i drugi (Stevanović, 2015), posljedično rezultira složenim hidrogeološkim odnosima. Razlike u razinama podzemne vode kao i visinskim kotama bliskih izvora i jezera dodatno ukazuju na kompleksnost hidrogeološkog sustava promatranog područja (Slišković & Ivičić, 2001). Složenoj hidrologiji pridonosi i duboka okršenost terena, tektonski procesi te različit kapacitet krške matrice i krških provodnika.

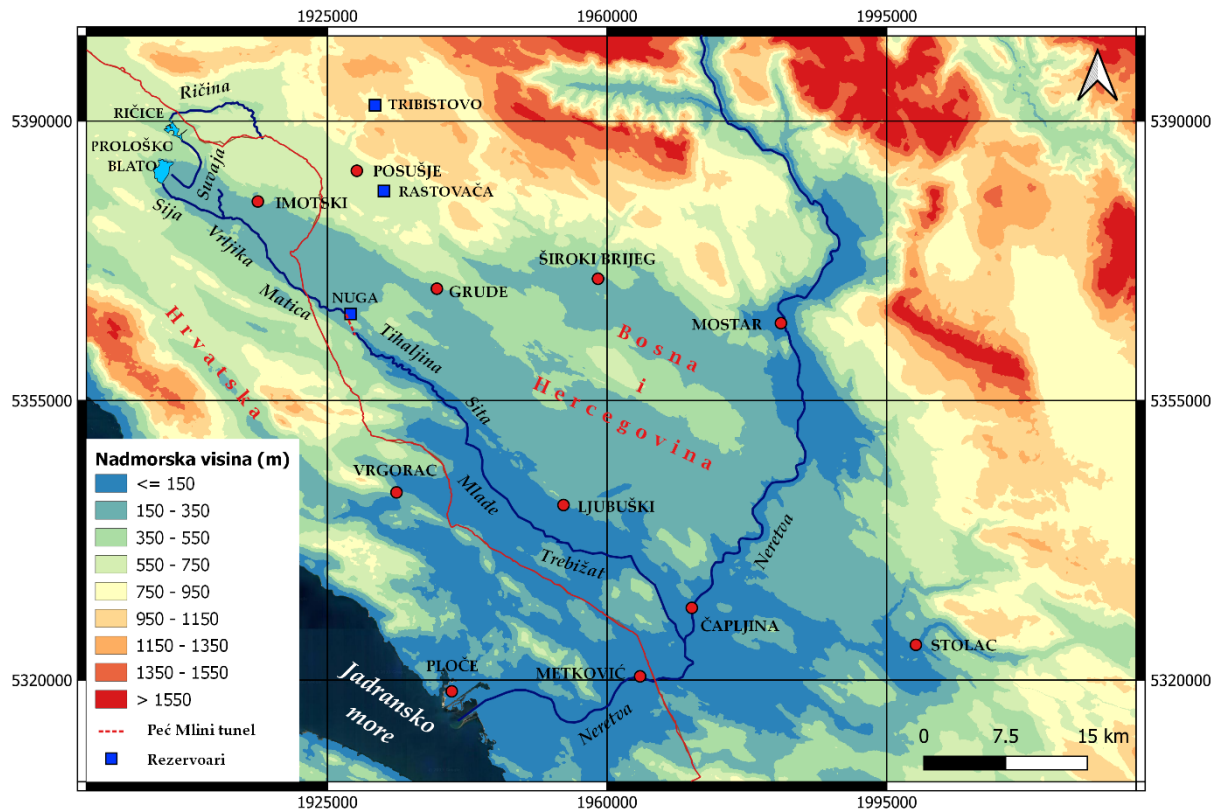
U kontekstu hidroloških karakteristika, vodna tijela prema Okvirnoj direktivi o vodama (Directive 2000/60/EC, eng. Water Framework Directive) dijele se na površinska i podzemna vodna tijela. Površinska vodna tijela definiraju se kao jasno izdvojeni i značajni elementi površinskih voda, poput jezera, akumulacija, potoka, rijeka, kanala, prijelaznih voda ili obalnih pojasa, dok se podzemna vodna tijela odnose na jasno definiran volumen podzemne vode unutar jednog ili više vodonosnika. Vodna tijela na području Imotske krajine obuhvaćaju podzemne i površinske vode, a prostorna raspodjela površinskih vodnih tijela prikazana je na slici 2.3, prema prostornim podacima INSPIRE registra na temu hidrografije, koji je u skladu s odredbama spomenute direktive.



**Slika 2.3** Geološka karta šireg područja Imotskog polja (modificirano prema: Raić i ostali, 1978)

Fluvijalni reljef na promatranom području pretežito je oblikovan erozijskim i akumulacijskim djelovanjem rijeka Ričine i Vrljike, a postojanje plićih vijugavih udubljenja na predjelu Glavine Donje ukazuje da je Vrljika tijekom povijesti nekoliko puta mijenjala korito (Zdilar, 2015). Vrljika je ujedno i jedini stalni tok u Imotskom polju i dio je šireg vodotočnog sustava Vrljika-Matica-Tihaljina-Sita-Mlade-Trebižat, dok je Ričina povremeni tok koji kreće iz izvora u Posuškom polju i koji je imao važnu ulogu u oblikovanju reljefa Imotskog polja, ali i u formiranju kanjona Badnjevice (Zdilar, 2015) kojim danas prolazi tok Suvaje iz akumulacije Ričice prema Imotskom polju. Tok od Ričine do Trebižata ujedno se naziva i rijeka sa osam, odnosno devet imena i dio je neposrednog sliva donje Neretve i Jadranskog mora (Željковиć, 2015).





Slika 2.4 Pregledna hipsometrijska karta s prikazom vodnih tokova

Sustav vodotoka prikazan na slici 2.4 svoj tok započinje povremenim tokom Ričine do ulijevanja u akumulacijsko jezero Ričice, izgrađeno 1989. godine u svrhu smanjivanja plavljenja Imotskog polja i osiguravanja dostatnih količina voda za uspostavu sustava navodnjavanja. Međutim zbog velikih gubitaka kroz dno i bokove, zadržavanje većih količina vode u akumulaciji je kratko te akumulacija nikad nije u potpunosti ispunila svoju svrhu (Bonacci & Roje-Bonacci, 2000b, 2000a, 2013). Izgradnjom akumulacije, bujične vode koje prolaze kanjonom Badnjevice su regulirane, stoga je kanjon veći dio godine suh. Nakon kanjona Badnjevice, Suvaja dolazi do poplavnog područja Prološkog blata koje se, osim površinskim tokom Suvaje, prihranjuje i podzemnim putem. Nastanak Prološkog blata prema Rogliću (1938) vezan je uz urušavanje bunarastih ponikava prilikom čega je došlo do odvajanja golemih stijena koje su formirale udubljenje koje se kasnije ispunilo vodom. Prološko blato je 1956. godine odijeljeno nasipom, čime je znatno izmijenjena dinamika plavljenja produžujući vrijeme plavljenja Prološkog Blata na više od pola godine (Vladović i ostali, 2022). Veličina poplavnog područja ovisi o količini voda, a jedino jezero na području Prološkog blata koje nikad ne presušuje je Krenica. Tok vode iz Prološkog blata prema kanalu Sija započinje kada razina vode dosegne razinu od 272 m n.m. (Zdilar, 2015). Kanalom Sija voda dolazi do Vrljike koja kod mjesta Zmijavci mijenja ime u Matica. Nakon toga Matica ponire kod Drinovaca i izvire u Peć Mlinima kao Tihaljina, nakon čega

nastavlja prema Neretvi kao Sita, Mlade i Trebižat (Slika 2.4). Na hidrološku sliku područja značajan utjecaj imaju hidrotehničke građevine - akumulacije Rastovača i Tribistovo u Posuškom polju, akumulacija Ričice, retencije Prološko blato i Nuga, hidrotehnički tuneli Petnjik i Peć Mlini, ali i ostale vodnogospodarske aktivnosti neophodne za dobro upravljanje vodama koje uključuju regulaciju vodotoka, izgradnju nasipa i ostale jednostavne zahvate (Ljubenković & Glavaš, 2017).

Izmjena površinskih i podzemnih tokova posljedica je složenog sustava cirkulacije vode u kršu, koje uz prekogranični karakter sliva, odnosno prihranjivanje vodama i iz Bosne i Hercegovine, otežava određivanje veličine i granica sliva, kao i identificiranje smjerova kretanja podzemnih voda koji su unatoč dosad provedenim istraživanjima još uvijek nepoznati (Bonacci & Roje-Bonacci, 2000a, 2004; Bonacci, Željковиć, & Galić, 2013; Bonacci & Andrić, 2014). Položaj granica sliva ovisi i o fluktuacijama razine podzemne vode, što posebno dolazi do izražaja tijekom naglih porasta razine kada se površina sliva brzo mijenja, a dio vode otječe prema susjednim slivovima (Bonacci, 2001; Bonacci, Željковиć, & Galić, 2013; Željковиć, 2015). Podzemne vode, uz veću količinu oborina, a kao rezultat ograničenog kapaciteta krških provodnika te malog gradijenta polja uzrokuju i pojavu plavljenja polja. S obzirom da se otjecanje voda iz polja pretežito odvija tunelima Petnjik i Peć Mlini te ponorima na jugoistočnom rubu polja (Nuga, Šainovac, Kongora, itd.), plavljenje polja posljedica je i nedovoljnog kapaciteta retencije Nuga te tokova nizvodno od Matice (Ljubenković & Glavaš, 2017). Nastupanjem mjera zaštite od poplava odvodni tuneli se zatvaraju što rezultira plavljenjem južnog dijela Imotsko-Bekijskog polja. Prekidanje površinskih tokova i pojava povremenih i ponirućih tokova specifičnost je krškog područja, a nastaje kao posljedica pojave razine podzemne vode ispod dna riječnih tokova zbog čega se pri postojanju ponikava uspostavljaju uvjeti za bržu infiltraciju površinske vode u podzemlje (Bonacci & Roje-Bonacci, 2008). Prisutnost influentnog toka kod vodotoka na širem području Imotskog polja, koja uzrokuje pojavu povremenih i ponirućih tokova, potvrđuje da je krško polje samo podsustav šireg sustava površinskog i podzemnog kretanja vode (Bonacci, 1987, 2009; Željковиć, 2015). Bojenjem je i dokazana povezanost ponora u Roškom i Rastovačkom polju te izvora Opačac i Utopišće, kao i Grudskog vrela u Imotskom polju (Bojanić i ostali, 1981; Slišковиć & Ivić, 2001; Zdilar, 2015). Povezanost uzvodnih i nizvodnih polja u kršu osobito je karakteristika dinarskog krša zbog čega polja u kršu imaju važnu ulogu u održavanju hidrološke ravnoteže krških područja (Bonacci, 2004; Biondić & Biondić, 2014).



### 2.1.3. Postojeće spoznaje u istraživačkom području

S obzirom na izrazitu heterogenost i lokalno visoku propusnost krša, istraživanja u krškim vodonosnicima usmjerena su ka određivanju granica krških slivova, definiranju njihovih hidroloških režima primjenom različitih metoda te procjenu njihove ranjivosti (Parise i ostali, 2018).

Istraživanja usmjerena na određivanje dinamike krških vodonosnika i identifikaciju hidroloških režima istražuju odnos i povezanost količine oborina i protoka na krškim izvorima. Kogovšek i ostali (2023) proveli su istraživanje na izvoru rijeke Unice u jugozapadnoj Sloveniji, gdje su korištenjem kombinirane analize podataka u vremenskoj i frekvencijskoj domeni identificirali uzročno-posljedične veze između oborina i odgovora vodonosnika na prihranjivanje. Primjenom djelomične unakrsne korelacije istražili su različite načine prihranjivanja izvora – autogenog ili alogenog. Nadalje, proširili su tradicionalni pristup analizom podataka visoke vremenske razlučivosti na prostornu dimenziju kroz simultano praćenje protoka izvora, oborina, ponirućih tokova i kretanja vode unutar špiljskih sustava.

Panagopoulos & Lambrakis (2006) su kroz analizu oborina, protoka i razina u piezometru, istražili hidrodinamička svojstva dvaju krških sustava u Grčkoj: Trifilia i Almyros. Analizom podataka u vremenskoj i frekvencijskoj domeni, utvrđene su značajne razlike između dvaju sustava. U jednom je sustavu zabilježeno blago okršavanje s velikim kapacitetom skladištenja uz dominaciju baznog otjecanja, dok je kod drugog sustava utvrđena koegzistencija baznog i direktnog otjecanja. Autori zaključuju da analiza vremenskih serija pruža ključne informacije o prirodi prijenosa vode u krškim vodonosnicima te može pomoći u boljim procjenama kapaciteta skladištenja i održivom upravljanju vodnim resursima, posebno u uvjetima promjenjivih hidroloških i klimatskih uvjeta.

Istraživanje krškog vodonosnika Salento u južnoj Italiji provode Balacco i ostali (2022) fokusirajući se na analizu promjena razina podzemne vode i količine oborina. Njihova analiza ukazuje na značajnu ulogu intenziteta i učestalosti oborina u promatranom hidrološkom sustavu, pri čemu razlike u obrascima oborina aktiviraju hidrodinamičke mehanizme u epikršu i nezasićenoj zoni. Autori također ističu kako lokalni uvjeti, uključujući geološke i morfološke karakteristike te obrasce oborina, utječu na dinamiku razine podzemnih voda.

Fiorillo (2009) analizom oborina i protoka krških izvora u području planinskog lanca Pincetini u pokrajini Catania u Italiji uočava postojanje memorijskog efekta, pri čemu svaka hidrološka godina ovisi o prethodnoj. Klimatski uvjeti i prethodna hidrološka godina tako imaju značajan utjecaj na veličinu trenutno zabilježenih protoka i pojavu potencijalnih suša, pružajući vrijedne informacije za učinkovito upravljanje vodnim resursima. Isti autor uz prethodno analizirani krški sustav, istražuje i krški sustav u planinskom lancu Matese te analizira povezanost oborina, protoka i temperatura zraka linearnom korelacijom i testovima detekcije trendova (Fiorillo i ostali, 2021). Uočava opći pad protoka u posljednjih nekoliko desetljeća koji prema navodima autora nije samo usko povezan s količinom oborina već i s temperaturom zraka. Također dovodi u vezu Standardizirani indeks oborine (SPI) i protoke na krškim izvorima (Fiorillo & Guadagno, 2010). Rezultati istraživanja pokazali su da niske SPI vrijednosti (npr. SPI<sub>12</sub> ispod -1) vode do smanjenja protoka izvora, dok vrijednosti SPI ispod -1,5 uzrokuju pojavu hidrograma bez izraženih sezonskih vršnih vrijednosti, što ukazuje na produljeni utjecaj suše.

Malík & Vojtková (2012) analiziraju dinamiku funkcioniranja devet krških izvora na području Slovačke koristeći analizu recesijskih krivulja. Primjenjuju hibridnu metodu recesijske analize gdje analiziraju parove krških izvora kako bi se istražila njihova međusobna povezanost te s obzirom na izračunate vrijednosti koeficijenata recesije određuju stupanj okršavanja sustava. Zaključuju da primjena recesijskih analiza omogućuje uvid u stupanj okršavanja i hidrološku povezanost u sustavu te da može poslužiti kao učinkovita metoda za procjenu kapaciteta skladištenja i dinamike pražnjenja u složenim krškim sustavima.

Analizu varijabilnosti protoka, memorijskog efekta vodonosnika i analizu recesijskih krivulja provode Fatoni i ostali (2024) na krškom sustavu u Indoneziji. Rezultati istraživanja pokazuju da okršenost krškog sustava igra ključnu ulogu u varijabilnosti protoka i sposobnosti akumulacije vode. Visoko razvijeni krški sustavi, koji uključuju postojanje krških provodnika, bilježe veću varijabilnost protoka i manji memorijski efekt, dok područja krške matrice očekivano bilježe manju varijabilnost protoka i dulji memorijski efekt. Istraživanje je pokazalo da se primjenom ovog jednostavnog pristupa, koji se oslanja isključivo na podatke o protoku, može učinkovito odrediti karakteristike krškog vodonosnika, a metoda se može primijeniti i u regijama s ograničenim hidrološkim podacima.

Istraživanja krških polja najčešće su usmjerena na proučavanje fenomena plavljenja. Tako su Blatnik i ostali (2024) analizirali duge vremenske serije meteoroloških i hidroloških podataka s ciljem razumijevanja dinamike poplava unutar Cerkljiškog polja u Sloveniji. Istraživanjem su ustvrdili kako su klimatske promjene, posebno smanjenje količine oborina i povećanje potencijalne evapotranspiracije, uz ljudske aktivnosti poput regulacije korita rijeka i izgradnje brana značajno promijenile obrasce poplava tijekom posljednjih desetljeća, koje su postale intenzivnije, frekventnije i dužeg vremenskog trajanja.

Stevanović i ostali (2021) proučavaju ranjivost krških vodonosnika na klimatske promjene, razvijajući inovativnu metodu CC-PESTO za procjenu ranjivosti bez izravnog korištenja klimatskih parametara. Umjesto toga, metoda se oslanja na analizu prostornih podataka o geološkim i hidrološkim karakteristikama, uključujući propusnost, nagib terena, režime otjecanja i sposobnost akumuliranja vode. Model je testiran na krškim područjima Crne Gore i Srbije, pri čemu su uspješno identificirana posebno ranjiva područja koja su podložna negativnim utjecajima klimatskih promjena.

Hartmann, Mudarra, i ostali (2014) koristeći GIS analizu i model VarKarst procjenjuju utjecaj hidroloških i klimatskih ekstrema na prihranjivanje krških vodonosnika na Mediteranu. Istraživanje otkriva nelinearno smanjenje količine oborina, što se može objasniti gotovo konstantnom evapotranspiracijom koja se održava unatoč promjenama u hidroklimatskim uvjetima. Isti autor također simulira dinamiku kretanja podzemnih voda u svim krškim područjima Europe koristeći isti model, a rezultati sugeriraju da globalni modeli podcjenjuju podzemne tokove vode u kršu (Hartmann i ostali, 2015). Isto objašnjava činjenicom da svojstvo heterogenosti krša omogućuje visoke kapacitete infiltracije, čime se sprječava površinsko otjecanje i smanjuje stvarna evapotranspiracija tijekom vlažnih uvjeta. S druge strane, omogućuje punjenje tijekom suhih uvjeta jer dio vode uvijek može prodrijeti kroz tanki sloj tla. Ova specifična karakteristika sugerira da bi krške regije mogle biti otpornije na klimatske promjene u pogledu poplava i suša s obzirom na dosad donesene zaključke s obzirom da se do sad nisu uzimali u obzir posebnosti krša.

Prva istraživanja hidroloških i hidrogeoloških odnosa u Imotskom polju bila su usmjerena ka razumijevanju nastanka poznatih krških fenomena Crvenog i Modrog jezera. Tako Gavazzi (1903) i Cvijić (1926) smatraju da su oba jezera nastala urušavanjem stropa podzemne špilje (Andrić i ostali, 2018), dok ih Roglić (1938) opisuje kao "bunaraste ponikve", isključujući time mogućnost da su u prošlosti funkcionirala kao ponori. Prema Rogliću (1938), erodirani materijali dolomita prisutni na samome dnu Crvenog jezera ukazuju na proces nastanka ponikve djelovanjem

podzemnih tokova na kontaktu vapnenaca s dolomitima, dok oštar prijelaz između okolnog terena i strmih padina ukazuje da se urušavanje ponikava i kod Crvenog i Modrog jezera dogodilo naglo (Zdilar, 2015). Roglić tako Crveno jezero opisuje kao mlađu urušenu ponikvu, dok za Modro jezero utvrđuje da je starijeg postanka, nastalo spajanjem dviju susjednih ponikvi. Zbog specifičnog hidroloških procesa i dotoka i gubitka vode kroz samo dno jezera, isti autor Modro jezero opisuje kao estavelu.

U razdoblju od 1955. do 1958. godine Petrik (1960) vrši hidrografska mjerenja u vodnim tijelima na području Imotske krajine i uočava složene hidrološke i hidrogeološke odnose među istima. S obzirom na dva do pet puta izmjerene veće oscilacije kod Modrog jezera u usporedbi s Crvenim, Petrik (1960) razdvaja hidrološke režime tih dvaju jezera. Iako i Roglić (1938) i Petrik (1960) smatraju da su hidrološki režimi Crvenog i Modrog jezera nezavisni, ipak im naglašavaju zajedničko porijeklo voda. Glavni razlog različitih oscilacija jezera pripisuju nejednakom kapacitetu krških provodnika (Bojanić i ostali, 1981). Na temelju svojih istraživanja, Petrik (1960) zaključuje da postoji povezanost između Crvenog jezera i povremenog izvora Jažva. Ovaj zaključak proizlazi iz činjenice da, kada se razina vode u jezeru spusti na kotu izvora, izvor presušuje (Bojanić i ostali, 1981). Petrik navodi i moguće lokacije izviranja podzemnih voda uslijed opadanja razine vode u jezerima ispod površine terena Imotskog polja (253 - 270 m n.m.) koje uključuju priobalne izvore i vrulje od Omiša duž Makarskog primorja. Kao najvjerojatnije mjesto izbijanja podzemnih voda navodi uvalu Vrulje. Bojanić i ostali (1981) također potvrđuju istu tvrdnju da većina podzemnih voda sjeverozapadnog dijela Imotskog polja i Prološkog blata teče prema moru i izvire u uvali Vrulje na dubini od 38 metara.

Milanović (1981) opisuje Crveno i Modro jezero kao ponikve koje su nastale uslijed kemijskog djelovanja vode na vapnence, dok Bahun (1991) njihov postanak pripisuje tektonskim procesima u gornjem Miocenu koji su uzrokovali presušivanje jezera, nakon čega su pod utjecajem egzogenih čimbenika formirane ponikve i duboke jame (Bonacci, 2006; Bonacci & Andrić, 2014).

Kovačević (1999), kao i Petrik (1960), ali i ostali (Gavazzi, 1903; Cvijić, 1926; Roglić, 1938) navode postojanje preljevne špilje na zapadnoj strani Crvenog jezera zbog koje dolazi do prelijevanja vode prema izvoru Jažva. Istu tvrdnju potvrđuje Garašić (2001) tijekom ekspedicije, ali trasiranja između navedenih vodnih tijela do danas nisu provedena tako da pretpostavljene veze među istima nisu dokazane (Bonacci, 2006).

Međunarodna špiljska ronilačka ekspedicija "Crveno jezero 98", pod vodstvom M. Garašića (2001), provedena je 1998. godine. Opsežnim istraživanjima utvrđene su dimenzije dna

Crvenog jezera od 300 x 300 m i površine jezera od 180 x 200 m. Dubina jezera je izmjerena na 454 točke, pri čemu je najdublja izmjerena točka bila 281 m, odnosno 6 m ispod razine mora. Ukupna visinska razlika, od najviše točke na obodu jezera do najniže zabilježene točke na dnu jezera, iznosila je 528 m. S obzirom na registriranje jakih vodenih strujanja u smjeru jugozapada prema samome dnu, autor smatra da je jezero još i dublje, no zbog tehničkih nedostataka to nije bilo moguće potvrditi. Tijekom ekspedicije istraženo je čak 800 m špiljskih kanala, a zabilježeno je postojanje velikog špiljskog kanala otvora 30 x 30 m na dubini od 175 m u istočnom dijelu jezera. Utvrđena je i konstantna temperatura vode od 7,9 °C na 50 m ispod površine jezera. Autor također navodi postojanje procesa inverznog okršavanja odnosno da se glavni procesi okršavanja stijena odvijaju u unutrašnjosti jezera i šire prema površini.

Ozimec (1999) navodi rezultate međunarodne speleoroničke ekspedicije provedene 1998. godine te ističe važnost otkrića dvaju špiljskih kanala koji se spajaju na špilju čiji se ulaz nalazi na najvišoj razini vodostaja jezera. Navedena špilja veza je Crvenog jezera s izvorom Jažva, što dokazuje i činjenica da se endemske vrste imotske gaovice koji obitavaju isključivo u Crvenom jezeru mogu naći i u spomenutom izvoru. S obzirom da je maksimalna razina vode u Crvenom jezeru znatno manja od maksimalne razine vode u Modrom jezeru, različite oscilacije u razinama vode mogu se djelomično objasniti postojanjem špilje koja odvodi višak vode k izvoru Jažvi (Bonacci, 2006).

Koristeći LIDAR metodu i hidroakustiku, Andrić i ostali su 2013. godine proveli istraživanja u Crvenom jezeru koja su rezultirala stvaranjem računalnog modela geometrije jezera i prikazom snage odjeka signala pri različitim dubinama (Andrić i ostali, 2013, 2017). Analizom snage odjeka signala utvrđuju nedostatak povratnog signala na sjeveroistočnoj strani jezera, što pripisuju prisutnosti krškog provodnika ili refrakciji valova zbog geometrije jezera. Upotrebom ronilice za daljinsko upravljanje (ROV) identificiraju sužavanje dna uslijed erozije materijala i mirovanje suspendiranih čestica na dnu jezera, što dovodi do odbacivanja prethodnih pretpostavki o prisutnosti krškog provodnika. Istu tvrdnju potvrđuju 2015. godine detektiranjem izoterme temperature od 10 °C na dubini od 30-90 m sugerirajući nedostatak strujanja kroz provodnike na samom dnu jezera (Andrić i ostali, 2017). Uočavaju i više vrijednosti električne vodljivosti u Crvenom nego u Modrom jezeru, što objašnjavaju mogućim dugotrajnim zadržavanjem vode u podzemlju. Temeljem prikupljenih podataka o kretanju razine vode u jezeru, razvijaju krivulju zapremnine u funkciji razine vode.

Speleoroničkom ekspedicijom Crveno jezero 2017. provedene iste godine izveden je zaron do dna jezera te su izvršena opsežna ekološka i biološka istraživanja jezera (Ozimec i ostali,

2017). Istraživanje je rezultiralo otkrićem postojanja špiljskih vodenih staništa, odnosno špiljske faune kao i otkriće novih vrsta. Uz imotsku gaovicu, endemičnu vrstu ribe, u Crvenom jezeru otkriveno je i prisustvo ilirskog vijuna.

Istraživanja hidroloških odnosa u krškom vodonosniku provode Bonacci & Roje-Bonacci (2000a, 2000b) i utvrđuju postojanje veze Prološkog blata s Buškim jezerom u Bosni i Hercegovini te akumulacije Ričice s izvorom Opačac što je dokazano i trasiranjima provedenim 1997. godine. Istraživanja na ovom području su provedena s ciljem rješavanja problema gubitka vode iz akumulacije Ričice koja se od svoje izgradnje 1989. godine do danas nije nikad u potpunosti ispunila (Bonacci & Roje-Bonacci, 2000a, 2008, 2013). Izgradnjom akumulacije tok Suvaje je reguliran, odnosno ispuštanja se vrše sukladno potrebama, najčešće u bezoborinskim razdobljima za potrebe navodnjavanja poljoprivrednih kultura. Za potrebe ispitivanja vodoodrživosti akumulacije Ričice, izbušena su dva piezometra neposredno uz desnu obalu akumulacije na međusobnoj udaljenosti od 125 metara, te su pritom detektirane fluktuacije razina podzemne vode u rasponu od 20 do 30 metara (Bonacci & Roje-Bonacci, 2000a, 2000b). Primjenom natrijevog fluoresceina utvrđeno je da se vode iz akumulacije preusmjeravaju prema izvorima rijeke Vrljike, točnije prema Opačcu (Bonacci & Roje-Bonacci, 2000a, 2000b, 2008). Isti autori opisuju Galipovac, Knezovića jezero, Mamića jezero, Prološko blato i Krenicu kao estavele zbog specifičnog pražnjenja i punjenja kroz bokove i dno te ih svrstavaju u isti krški vodonosnik. Zaključuju da su fluktuacije u vodostajima Crvenog i Modrog jezera slične i da prate oscilacije u razinama podzemne vode zbog čega ih svrstavaju u isti krški vodonosnik. Crveno jezero zbog izravne veze s krškim provodnikom nikad ne presušuje dok Modro jezero presušuje kada razina podzemne vode padne ispod razine dna. Upravo zbog toga Crveno jezero opisuju kao prirodni piezometar u kojem je moguće pratiti fluktuacije podzemnih voda.

Korištenjem bioloških trasera, odnosno praćenjem endemskih vrsta imotske gaovice u svrhu razumijevanja hidroloških odnosa i otkrivanja novih podzemnih veza, Palandačić i ostali (2012) uočavaju genetsku sličnost između riba u Crvenom jezeru i Vrljici, Vrljici i Tihaljini ali i između riba u imotskim izvorima i izvorima pokraj Gruda. Isti autori zaključuju da na istraživanim lokacijama nema izoliranih populacija riba što ukazuje na međusobnu povezanost lokacija.

Istraživanja krškog vodonosnika Imotskog polja provodi i Ljubenkov (2015) proučavajući pojavu plavljenja polja. Uočava da pojava plavljenja polja nije isključivo povezana s količinom oborina. Svoje navode potvrđuje činjenicom da je maksimalna mjesečna količina oborina od 443 mm (prosinac, 1959.) rezultirala protokom od 99,4 m<sup>3</sup>/s, mjerenim na postaji Kamenmost, i plavljenjem 4097 ha polja, dok je ista količina u listopadu 1974. rezultirala protokom od 60,9 m<sup>3</sup>/s

i nije prouzročila plavljenje polja. Navedeno ukazuje na kompleksne hidrološke procese u krškom vodonosniku koji prema Ljubenkovu prikuplja vode indirektnog područja sliva vodotoka Suvaje, vode jezera promatranog područja te vode krškog podzemlja. Plavljenje polja, u usporedbi s nekadašnjim plavljenjima, danas su mnogo manja kao rezultat antropogenog utjecaja, odnosno izgradnje akumulacije Ričice, retencije Prološko blato i kanala Petnjik.

## **2.2. Motivacija i svrha rada**

Krška područja predstavljaju izuzetno kompleksne hidrološke sustave obilježene složenim gibanjima i heterogenošću krša koja rezultira varijabilnim i često nepredvidivim tokovima vode, dodatno otežavajući razumijevanje složenih procesa u kršu. U kontekstu Imotskog polja, koje karakteriziraju jedinstveni krški fenomeni i specifična dinamika vode u podzemlju, istraživanje hidroloških procesa ima ključnu ulogu u razumijevanju dinamike vodonosnika, produbljivanju spoznaja o krškim oblicima te njihovim međusobnim interakcijama, a s primarnim ciljem zaštite krškog vodonosnika i krških morfoloških oblika. Navedeno predstavlja jedan od osnovnih motiva za izradu disertacije na tematiku identifikacije hidroloških procesa u Imotskom polju.

Utjecaj klimatskih promjena na Imotsko polje je sveprisutan, mijenjajući režim i dinamiku voda te predstavljajući opasnost za krški vodonosnik. Produljena sušna razdoblja, uz smanjenje oborina, dovode do redukcije vodnih zaliha putem smanjenog površinskog i podzemnog otjecanja, dok intenzivnije kratkotrajne oborine često rezultiraju bujičnim vodotocima i poljima pod vodom. Oba slučaja predstavljaju prijetnju dostupnosti vode bilo zbog nedostatnih količina ili lošeg stanja voda. S obzirom da se sušna razdoblja produžavaju, a povijesni minimumi su sve češći, ugroženost izvora Opačac koji služi kao vodozahvat za šire područje Imotskog je evidentna. Pored klimatskih promjena, ugroze u dostupnosti vode mogu biti uzrokovane i drugim čimbenicima. Potres magnitude 3,7 prema Richteru koji se dogodio 2018. godine uzrokovao je poremećaj u izdašnosti izvora. Tijekom tog razdoblja, izvor je četiri dana bio na svojoj najnižoj razini u povijesti, što je predstavljalo prijetnju za sustav vodoopskrbe. Klimatske promjene dalje potenciraju ove izazove, utječući na redovitost i količinu oborina, što je vidljivo i kod Modrog jezera koje je u ovom desetljeću četiri puta presušilo. Posljedice ovih promjena imaju široki utjecaj na poljoprivredu, energetiku i turizam, sektore ovisne o stabilnosti klime i dostupnosti vode.

Svrha izrade predmetne disertacije je razumijevanje hidroloških i hidrogeoloških procesa u Imotskom polju u svjetlu klimatskih promjena i posljedica istih te stjecanje novih spoznaja o hidrološkom funkcioniranju pojedinačnih krških fenomena i polja u cjelini. S obzirom na oskudnost postojećih saznanja o području razmatranja i činjenici da je većina zaključaka do sada

donesena na temelju povremenih motrenja zbog nepostojanja sustava kontinuiranog mjerenja, detaljnija analiza klimatskih i hidroloških parametara sa svih postojećih mjernih postaja, kao i klimatskih i fizikalno-kemijskih parametara s novopostavljenih postaja, omogućit će identifikaciju dinamičkih procesa u hidrološkom režimu te pružiti bolji uvid u hidrološko funkcioniranje pojedinačnih krških oblika. Detekcija klimatskih trendova i trendova hidroloških parametara pružit će uvid u stanje vodnih tijela i polja u cjelini uslijed sveprisutnih klimatskih promjena, a izradom hidrološkog modela upotpunit će se slika hidrodinamike razmatranog područja. Doneseni zaključci pridonijeti će identifikaciji zastupljenosti ekstremnih pojava uslijed klimatskih promjena te njihovom utjecaju na regionalni tok i dostupnost vode u kršu, a sukladno tome moći će se primijeniti odgovarajuće mjere zaštite raspoloživih vodnih resursa kao i mjere prilagodbe klimatskim promjenama po pitanju vodoopskrbe i upravljanja vodnim resursima. Između ostalog, olakšati će donošenje informiranih odluka o zaštiti krškog vodonosnika, očuvanju ekološke ravnoteže i osiguranju stabilnosti vodoopskrbe za lokalno stanovništvo.

U konačnici, multidisciplinarni pristup istraživanju hidroloških procesa u krškom vodonosniku šireg područja Imotskog polja ne samo da će proširiti znanje o krškim fenomenima, već će omogućiti i konkretnu primjenu rezultata u praksi, pridonoseći dugoročnoj održivosti ovog jedinstvenog ekosustava.

### **2.3. Ciljevi i hipoteze istraživanja**

Ciljevi istraživanja definirani su sukladno aktualnosti problematike klimatskih promjena i dostupnosti vode u kršu, uzimajući u obzir kompleksnost cirkulacije površinske i podzemne vode razmatranog područja te postojeće spoznaje o području istraživanja. S obzirom na prethodno opisanu problematiku, postavljaju su sljedeći ciljevi istraživanja:

- Detektirati trendove klimatoloških i hidroloških parametara na skali proučavanog područja,
- Identificirati promjene i procese u Imotskom polju uzrokovane klimatskim promjenama,
- Analizirati utjecaj identificiranih promjena i procesa na hidrološko funkcioniranje razmatranog područja te na dostupnost vode u kršu,
- Pridonijeti boljem razumijevanju krškog vodonosnika na temelju uspostavljenog monitoring sustava,
- Identificirati povezanost pojedinačnih krških oblika,



- Izraditi hidrološki model izvora Opačac i Crvenog jezera te definirati hidrodinamiku okolnog krškog vodonosnika respektirajući promjene u hidrološkom režimu izazvane klimatskim promjenama.

Na temelju iznesenih ciljeva, formuliranje hipoteza stvara teorijsku osnovu za ispitivanje povezanosti između varijabli i za predviđanje potencijalnih ishodnih rezultata. U ovom istraživanju, hipoteze su razvijene na temelju postojećih saznanja i relevantnih teorijskih okvira, s ciljem analize hidroloških odnosa među krškim fenomenima, kao i specifičnih aspekata i veze između klimatoloških i hidroloških čimbenika te njihovog utjecaja na vodne resurse. S obzirom na prethodno navedeno, formulirane su sljedeće hipoteze koje će se testirati u okviru ovog istraživanja:

*Hipoteza 1:* Na širem području Imotskog polja postoji značajan porast temperatura zraka uz povećanje broja sušnih razdoblja i smanjenje količine oborina, uz posljedično smanjenje vodostaja i protoka u vodotocima.

*Hipoteza 2:* Krška jezera na širem području Imotskog polja dio su istog krškog vodonosnika, a složenost hidrološkog sustava, koja se očituje u različitoj dinamici kretanja voda među pojedinim jezerima (npr. usporedba Crvenog i Modrog jezera), proizlazi iz interakcije površinskih i podzemnih voda, pri čemu podzemne vode posebno utječu na varijacije u hidrološkom režimu.

*Hipoteza 3:* Dostupni modeli predstavljaju učinkovite alate za simulaciju ponašanja krškog sustava proučavanog područja.

## **2.4. Znanstveni doprinos**

Očekivani znanstveni doprinos ovog istraživanja ogleda se u sveobuhvatnoj analizi širokog spektra podataka, klimatoloških i hidroloških, prikupljenih s više mjernih točaka na širem području Imotske krajine. Analizom su obuhvaćena sva krška jezera na ovom prostoru, a poseban fokus dan je na detaljnu hidrološku i hidrogeološku analizu izvora Opačac, koji predstavlja ključni vodozahvat za grad Imotski i njegovu okolinu. Novi rezultati istraživanja, kako na lokalnoj tako i na regionalnoj razini, omogućuju bolji uvid u dinamiku podzemnih voda te potencijalne promjene uzrokovane klimatskim utjecajima, pružajući pritom važnu osnovu za buduće planiranje i upravljanje vodnim resursima.

Istraživanje pridonosi boljem razumijevanju hidroloških i hidrogeoloških procesa u krškim područjima, što je ključno za očuvanje i održivo korištenje podzemnih i površinskih voda. Poseban

naglasak stavlja se na prilagodbu postojećih metoda analize i modeliranja hidroloških sustava u kršu, te na implementaciju novih alata za identifikaciju i predviđanje hidroloških režima.

Posebno vrijedan doprinos ovog rada odnosi se na analizu podataka prikupljenih novo uspostavljenim monitoring sustavom, koji omogućuje detaljniju analizu vodnih tokova unutar kompleksnog krškog terena. Hidrološki režim Imotskog polja i okolnog krškog masiva ima izravan utjecaj na lokalnu vodoopskrbu te poljoprivrednu i energetska proizvodnju, čime ovo istraživanje postaje neophodno ne samo u znanstvenom kontekstu, već i u socio-ekonomskom razvoju šireg područja.

Specifični znanstveni doprinosi uključuju:

- Identifikaciju ključnih hidroloških procesa i njihovih promjena uzrokovanih mijenjanjem klime,
- Identifikaciju hidroloških procesa u krškom vodonosniku kroz primjenu i prilagodbu postojećih recesijskih metoda na jezerskom okruženju,
- Detekciju međusobnih odnosa i povezanosti pojedinih krških formacija koje dosad nisu bile dovoljno istražene, a koje će pomoći u potvrđi pretpostavljenih interakcija unutar krškog sustava,
- Izradu hidrološkog modela za anticipaciju budućih promjena u hidrološkom režimu.

## 3. METODOLOGIJA

Za razumijevanje hidrološkog režima i utjecaja klimatskih promjena na dinamiku krškog vodonosnika šireg područja Imotskog polja provedena je sveobuhvatna analiza širokog skupa podataka prikupljenih s niza mjernih točaka na širem području obuhvata. Ova analiza obuhvaća klimatološke i hidrološke podatke s dvije postojeće klimatološke i sedam postojećih hidroloških postaja DHMZ-a, analizu raspoloživih podataka iz Crvenog jezera te podatke prikupljene s dvije novouspostavljene klimatološke i sedam novouspostavljenih hidroloških postaja u Imotskom polju. Pregled navedenih postaja prikazan je na slici 3.6. U nastavku ovog rada detaljno su opisane korištene metode s ciljem razumijevanja složenih procesa koji utječu na hidrološki sustav i klimatske uvjete ovog područja.

### 3.1. Statističke metode

#### 3.1.1. Homogenost podataka

Provjera homogenosti podataka provedena je s ciljem osiguranja pouzdanosti i točnosti podataka koji će se koristiti za analizu klimatskih i hidroloških trendova te za identificiranje potencijalne godine prekida, odnosno promjene u vremenskoj seriji podataka. Homogenost podataka ispitana je standardnim testom normalne homogenosti (SNHT – Standard Normal Homogeneity Test) (Alexandersson, 1986), uz primjenu statističkog softvera XLSTAT, koji se koristi kao dodatak za Microsoft Excel. Testiranje je provedeno na podacima godišnjih minimalnih, srednjih i maksimalnih temperatura zraka, godišnjih količina oborina te godišnjih

minimalnih, srednjih i maksimalnih vodostaja i protoka, ovisno o dostupnosti podataka i raspoloživom vremenskom nizu podataka na pojedinoj postaji. Svi korišteni podaci su službeni podaci DHMZ-a.

SNHT test testira nultu hipotezu da su testirane vrijednosti neovisne i identično raspoređene, te alternativnu hipotezu da postoji prekid u vremenskoj seriji, tj. da dolazi do postupnog pomaka srednje vrijednosti (Costa & Soares, 2009). Testom se može odrediti vjerojatna godina prekida i stoga se naziva test specifičan za lokaciju (Wijngaard i ostali, 2003).

Ukoliko je SNHT testom identificiran pomak u srednjoj vrijednosti između dviju podserija, značajnost pomaka testirana je t-testom, uz primjenu statističkog softvera XLSTAT. T-test se koristi za utvrđivanje statističke značajnosti razlika srednjih vrijednosti dviju skupina podataka, testirajući nultu hipotezu da nema značajne razlike u srednjim vrijednostima naspram alternativne hipoteze da razlika postoji (Prescott, 2005). Za statističku značajnost razlika između skupina odabrana je razina značajnosti od 0,05.

#### 3.1.2. Analiza trendova

U analizi trenda korišten je pravac linearne regresije. Jednadžba linearnog trenda definirana je kao:

$$y = a \cdot t + b \quad (1)$$

gdje je  $y$  varijabla od interesa (temperatura zraka u °C ili oborina u mm),  $t$  je oznaka vremena,  $a$  je koeficijent nagiba, a  $b$  je odsječak na osi  $y$ . Predznak koeficijenta  $a$  označava trend (padanje ili rast). Snaga linearne veze, odnosno povezanosti između varijabli  $t$  i  $y$  označena je koeficijentom determinacije koji se definira kao kvadrat Pearsonovog koeficijenta korelacije:

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \right]^2 \quad (2)$$

gdje su  $x_i$  i  $y_i$  pojedinačne varijable od interesa, a  $\bar{x}$  i  $\bar{y}$  srednje vrijednosti odgovarajućih varijabli (Pearson, 1896). Koeficijent determinacije kvantificira koliko varijabilnosti u ovisnoj varijabli može biti objašnjeno varijacijom nezavisne varijable u regresijskom modelu (Renaud & Victoria-Feser, 2010). Vrijednosti koeficijenta determinacije poprimaju vrijednosti između 0 i 1, gdje vrijednost bliža 1 ukazuje da odabrani model dobro opisuje varijabilnosti zavisne varijable.

Analiza trendova izvršena je korištenjem neparametarskih testova; Theil-Sen (TS) procjenitelj (Sen, 1968) za određivanje nagiba trenda te Mann-Kendall (M-K) testa (Mann, 1945;

Kendall, 1975) za procjenu statističke značajnosti trenda. Prednost korištenja neparametarskih testova je što ne zahtijevaju distribucijsko prilagođavanje podataka i utjecaj ekstremnih vrijednosti (tzv. outlieri), koji su uobičajeni u meteorološkim podacima je zanemariv (Hirsch & Slack, 1984; Mewded i ostali, 2022). M–K test uspoređuje nul hipotezu da nema trenda u vremenskoj seriji uz alternativnu hipotezu da trend postoji. U ovom radu korišten je modificirani Mann–Kendall test za Matlab (Fatichi, 2023), koji uzima u obzir modifikaciju Hameda i Ramachandra Raoa (Hamed & Ramachandra Rao, 1998) u pogledu prisutnosti autokorelacije u podacima. Statistička značajnost trendova ispitana je na razini pouzdanosti od 95%. Ako postoji linearni trend u podacima, veličina monotonog trenda u vremenskoj seriji procjenjuje se korištenjem Theil–Senovog procjenitelja. Magnituda trenda ( $\beta$ ) jednaka je medijanu vrijednosti nagiba između vrijednosti  $x_i$  i  $x_j$  u vremenskim koracima  $i$  i  $j$  kako slijedi:

$$\beta = \text{median} \left( \frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \forall i < j \quad (3)$$

Magnituda trenda odražava strminu nagiba, dok njegov predznak ukazuje na monotonost trenda. U ovom radu korišten je test Theil–Sen procjenitelj za Matlab (Arnout Tilgenkamp, 2024).

#### 3.1.3. Analiza oborina

Varijabilnost oborina analizirana je pomoću koeficijenta varijacije (*CV* – eng. *Coefficient of Variation*), standardizirane anomalije oborina (*SRA* – eng. *Standardized Rainfall Anomaly*) i indeksa koncentracije oborina (*PCI* – eng. *Precipitation Concentration Index*).

Koeficijent varijacije (*CV*) oborina ukazuje na varijabilnost oborina u promatranom vremenskom intervalu na određenoj lokaciji. Viša vrijednost koeficijenta tako ukazuje na veću varijabilnost oborina i obratno, a definira se na sljedeći način:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4)$$

gdje je  $\sigma$  standardna devijacija, a  $\mu$  srednja količina oborine. *CV* se koristi za klasificiranje stupnja varijabilnosti oborina definiranog kao niskog ( $CV < 20$ ), umjerenog ( $20 < CV < 30$ ) i visokog ( $CV > 30$ ) (Hare, 2003; Asfaw i ostali, 2018).

Standardizirana anomalija oborina (*SRA*), ili u nekoj literaturi i Standardizirani indeks anomalije oborina (Katz & Glantz, 1986; Agnew & Chappell, 1999; Zakwan & Ara, 2019; Alemu & Bawoke, 2020; Mewded i ostali, 2022; Mohamed i ostali, 2022) pruža informacije o učestalosti i jakosti suše. S obzirom na vrijednost *SRA*, sušna razdoblja se mogu klasificirati kao ekstremna

( $SRA < -1.65$ ), jaka ( $-1.28 > SRA > -1.65$ ), umjerena ( $-0.84 > SRA > -1.28$ ) i razdoblja bez suša ( $SRA > -0.84$ ) (Agnew & Chappell, 1999). SRA definira se kao:

$$SRA = \frac{P_i - \bar{P}_i}{\sigma} \cdot 100 \quad (5)$$

gdje je  $P_i$  godišnja količina oborina u  $mm$ ,  $\bar{P}_i$  srednja godišnja količina oborine u promatranom vremenskom periodu, a  $\sigma$  standardna devijacija godišnje količine oborina u istom periodu promatranja.

Indeks koncentracije oborina (PCI) je bezdimenzionalna vrijednost kojom se ispituje heterogenost oborina (Asfaw i ostali, 2018), odnosno varijabilnost i distribucija oborina na različitim vremenskim skalama. Najčešće korištena skala je godišnja i definira se na sljedeći način:

$$PCI_{annual} = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{(\sum_{i=1}^{12} P_i)^2} \cdot 100 \quad (6)$$

gdje je  $P_i$  mjesečna količina oborine u mjesecu  $i$  ( $mm$ ). Osim na godišnjoj razini, PCI se može izračunati i na sezonskoj razini ili na razini koja uključuje podjelu na sušna i kišna razdoblja (de Luis i ostali, 2011). S obzirom na vrijednost PCI, distribucija oborina prema Oliver (1980) može biti ujednačena ( $PCI < 10$ ) ili sezonska ( $11 < PCI < 20$ ). Za vrijednosti PCI iznad 20, distribucija oborina je s velikim sezonskim razlikama i s rastom mjesečne koncentracije oborina. Također, indeks mjesečne koncentracije oborina može se klasificirati kao nizak (kod jednolike raspodjele oborina), umjeren za vrijednosti od 11 do 15, visok za vrijednosti od 16 do 20 i vrlo visok za vrijednosti iznad 21 (Jaswal & Kumar, 2014; Asfaw i ostali, 2018; Zakwan & Ara, 2019; Alemu & Bawoke, 2020; Mehzabin & Mondal, 2021; Mohamed i ostali, 2022).

Prostorna distribucija oborina analizirana je korištenjem softvera QGIS, uz primjenu interpolacijske metode inverzne udaljenosti koja se definira kao prostorno ponderirani prosjek vrijednosti uzorka unutar područja istraživanja (Shepard, 1968; Babak & Deutsch, 2009). Izražava se kao:

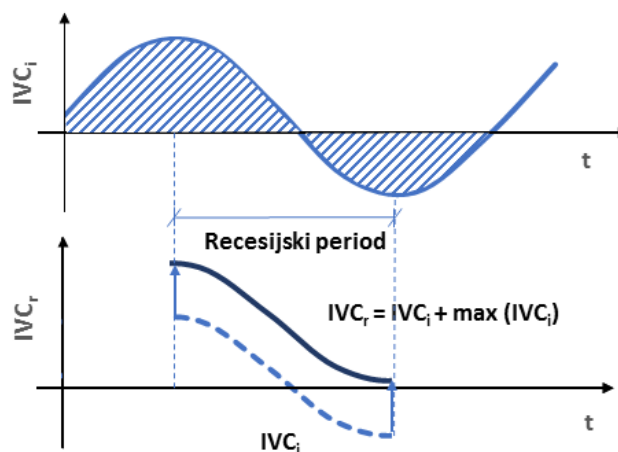
$$z_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{z_i}{d_i^p} \right)}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_i^p} \right)} \quad (7)$$

gdje je  $z_p$  vrijednost atributa koji se procjenjuje,  $z_i$  vrijednost atributa pojedinačne točke promatranja,  $d_i$  udaljenost procijenjene točke i točke promatranja,  $n$  broj točaka u uzorku, a  $p$

težinski koeficijent ili eksponent udaljenosti (Liu i ostali, 2021). Eksponent udaljenosti težinski je parametar kojim se kontrolira ovisnost težine o udaljenosti (Medved i ostali, 2010). Tako bliže točke interpolacije imaju veći utjecaj na rezultirajuću interpoliranu vrijednost. Što je eksponent bliži nuli, rezultirajuća površina postaje sličnija ravnini koja se proteže između svih referentnih podataka, dok se s povećanjem eksponenta naglasak stavlja na topografiju površine, dajući veću važnost vrijednostima bližim referentnim točkama (Medved i ostali, 2010). Najčešća vrijednost koja se primjenjuje kod eksponenta udaljenosti je 2 i tada se ova metoda naziva interpolacijska metoda inverzne kvadratne udaljenosti.

#### 3.1.4. Kvazirecesijske krivulje

Hidrološki režim Crvenog jezera praćen je analizom kvazirecesijskih krivulja i odgovarajuće anvelope krivulja, odnosno analizom glavne recesijske krivulje (*MRC – eng. Master Recession Curve*). Pojam kvazirecesijske krivulje značenjem je ekvivalentno recesijskoj krivulji koja predstavlja otjecanje nakon prestanka oborina (Slika 3.1). Ipak, budući da se recesijske krivulje primarno koriste za analizu vodotoka, a ne jezera kao u ovom slučaju, dodan je prefiks "kvazi" kako bi se istaknula prilagodba i primjena na jezerskom okruženju (Vrsalović i ostali, 2022).



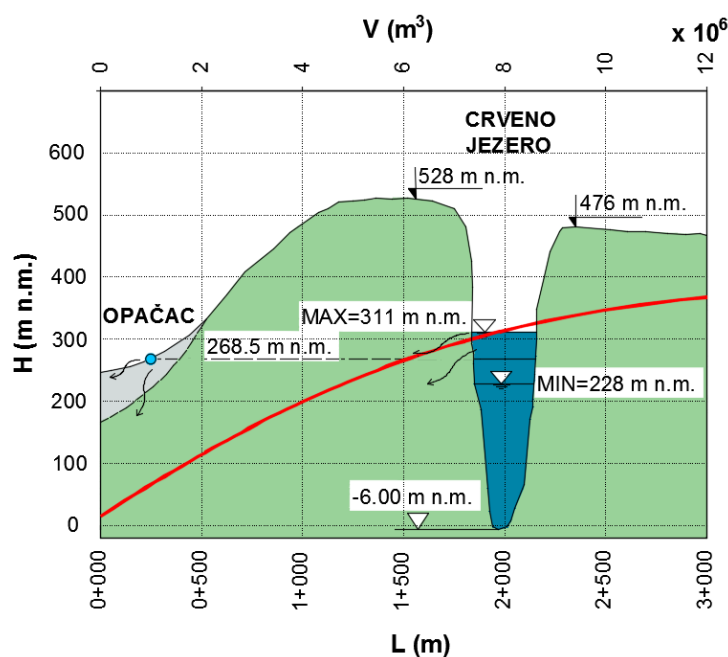
**Slika 3.1** Izdvajanje recesijskog perioda, odnosno kvazirecesijske krivulje ( $IVC_r$ ) iz krivulje promjene volumena u vremenu

Pri korištenju recesijske analize, definirana je nova varijabla, integralna promjena volumena ( $IVC – eng. Integral Volume Change$ ) koja opisuje promjenu volumena jezera u vremenu. Iako je integralna promjena volumena, s obzirom na definiciju i mjernu jedinicu, u osnovi slična protoku, analiza jezera s istovremenim dotocima i otjecanjima vode zahtijevala je novu terminologiju koja bi jasno razgraničila ove pojmove. Integralna promjena volumena definira se kao:

$$IVC_i = (V_{i+1} - V_i) / \Delta t \quad (8)$$

gdje su  $V_i$  i  $V_{i+1}$  volumeni jezera, a  $\Delta t$  vremenski inkrement.

Vrijednosti integralnih promjena volumena za svaku pojedinu vrijednost vodostaja izračunate su korištenjem postojećeg morfometrijskog modela Crvenog jezera (Slika 3.2). Morfometrijski model koji definira krivulju volumena kao funkciju razine vode uspostavljen je opsežnim istraživanjem Andrića i Bonaccija (Bonacci & Andrić, 2014; Andrić i ostali, 2017).



**Slika 3.2** Krivulja volumena Crvenog jezera u funkciji razine vode, uz prikaz poprečnog presjeka Crvenog jezera i izvora Opačac s naznačenim zabilježenim minimumom i maksimumom u Crvenom jezeru

Kako bi se spriječila pojava negativnih vrijednosti integralnih promjena volumena, primijenjena je transformacija dobivenih podataka dodavanjem maksimalno izračunate vrijednosti svakoj od vrijednosti ( $IVC_r$ ), budući da se recesijski segmenti, odnosno glavna recesijska krivulja, aproksimiraju Mailletovom eksponencijalnom jednadžbom (10) koja je definirana samo za pozitivne vrijednosti.

$$IVC_r = IVC_i + \max(IVC_i) \quad (9)$$

Identifikacija vodonosnika provedena je analizom segmenata recesije integralnih promjena volumena Crvenog jezera. Segment hidrograma koji pokazuje postupno smanjenje otjecanja s malo ili nimalo oborina naziva se recesijska krivulja. Svako recesijsko razdoblje predstavlja kratkoročni događaj sa specifičnim karakteristikama koje ovise o varijabilnosti skladištenja vode, brzini iscrpljivanja podzemnih rezervi, gubicima, te karakteristikama vodonosnika (Nathan & McMahon, 1990; Fiorotto & Caroni, 2013). Varijabilnost svakog recesijskog razdoblja, između



ostaloga, proizlazi iz različite prostorne distribucije oborina i klimatskih uvjeta. Da bi se odredile karakteristike recesijskih razdoblja, potrebno je osrednjavanjem minimizirati varijabilnost pojedinih recesijskih razdoblja, iz gore navedenih razloga. Podaci se uprosječuju kreiranjem anvelope pojedinačnih segmenata recesije odnosno glavne recesijske krivulje (MRC). MRC daje podatke o prosječnim karakteristikama komponenti utjecanja, odnosno hidrološkoj funkciji jezera i okolnog područja. Metode korištene u konstrukciji glavne recesijske krivulje uključuju Matching strip metodu, Tabulation metodu i metodu po Petrasu (Petras, 1986).

Tabulation metoda predstavlja najjednostavniju metodu od navedenih. Kod ove metode, početna vrijednost glavne recesijske krivulje odgovara najvećoj početnoj vrijednosti svih recesijskih segmenata. Ostali segmenti sortiraju se od najviše prema najnižoj vrijednosti i postavljaju u stupce dok se ne poravnaju vodoravno (Toebeš i ostali, 1969; Sujono i ostali, 2004). Konačne vrijednosti glavne recesijske krivulje su prosječne vrijednosti svih recesijskih segmenata.

Kod Matching strip metode, svi recesijski segmenti se iscrtavaju, superponiraju te podešavaju horizontalno sve do formiranja kompozitne krivulje MRC (Nathan & McMahon, 1990). Prilikom razmatranja velikog broja recesijskih segmenata, ova metoda postaje nepraktična, zbog čega se češće primjenjuje prilagođena Matching strip metoda (Posavec i ostali, 2006, 2010). Prvi korak u ovoj metodi obuhvaća sortiranje recesijskih segmenata od najviše do najniže vrijednosti. Prvi recesijski segment, odnosno segment s najvećom početnom vrijednošću, testira se s različitim regresijskim modelima (linearnim, logaritamskim, polinomom drugog reda, potencijskim i eksponencijalnim). Model koji najbolje odgovara promatranom segmentu recesije je model s najvećim koeficijentom determinacije ( $R^2$ ). Drugi segment recesije, onaj s drugom najvećom početnom vrijednošću, translata se na odgovarajuću poziciju sukladno pripadajućem vremenskom pomaku. Sljedeći korak je testiranje kompozitne krivulje prvog i drugog segmenta recesije s različitim regresijskim modelima. Odabire se najprikladniji regresijski model i sljedeći se recesijski segment translata na odgovarajuću poziciju na prethodno definiranoj krivulji. Postupak se ponavlja za sve segmente recesije i rezultat je MRC.

Prema Petrasu (Petras, 1986), svaka recesijska krivulja može se podijeliti u segmente i modelirati Mailletovom jednadžbom. Na taj način svaki recesijski segment definiran je s početnim protokom  $Q_0$  i koeficijentom recesije  $\alpha$  u vremenu  $t$ :

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t} \quad (10)$$

Prikaz Mailletove jednadžbe na polulogaritamskom papiru je ravna linija. Ista se jednadžba može izraziti na sljedeći način:

$$\log Q_t = \log Q_0 - 0,4343 \cdot \alpha \cdot t \quad (11)$$

Postupak se sastoji od aproksimacije empirijske krivulje ravnom linijom. Nagib pravca je  $\alpha_1$ , a sjecište s osi y je  $Q_{01}$ . Oduzimanjem preostalih vrijednosti empirijske krivulje od vrijednosti pravca dobivaju se empirijske vrijednosti drugog segmenta. Nakon toga, drugi segment se aproksimira ravnom linijom s nagibom  $\alpha_2$  i sjecištem s osi y u točki  $Q_{02}$ . Postupak se zatim ponavlja za n segmenata recesijske krivulje, koji se spajaju u jednu krivulju principom superpozicije:

$$Q = Q_{01} \cdot e^{-\alpha_1 t} + Q_{02} \cdot e^{-\alpha_2 t} + \dots + Q_{0n} \cdot e^{-\alpha_n t} \quad (12)$$

### 3.1.5. Korelacija i spektralna analiza

Analiza podataka u vremenskoj domeni istražuje razvoj signala tijekom vremena, analizirajući njegove promjene, amplitudu i dinamiku unutar vremenskih intervala. S druge strane, analiza u frekvencijskoj domeni dekomponira signale na njihove frekvencijske komponente, omogućavajući identifikaciju prisutnih frekvencija i njihovih magnituda unutar signala. U ovom istraživanju, analiza signala u vremenskoj i frekvencijskoj domeni provedena je na podacima protoka na izvoru Opačac te na integralnim promjenama volumena u Crvenom jezeru. Primjena analize signala u različitim domenama omogućava bolje razumijevanje svojstava signala s obzirom na vremenski tijek događaja i frekvencijski spektar.

Korelacija kvantificira linearnu vezu između dviju serija u vremenskoj domeni. Funkcija autokorelacije (*ACF* – eng. *Autocorrelation function*) mjeri stupanj korelacije između iste serije podataka s različitim vremenskim odmakom. U nastavku je dan diskretni oblik autokorelacijske funkcije (Mangin, 1984; Larocque i ostali, 1998; Denić-Jukić i ostali, 2020):

$$r(k) = \frac{C(k)}{C(0)} = \frac{C(k)}{\sigma^2} \quad (13)$$

$$C(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x}), \quad k = 0, 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

$$C(0) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2 \quad (15)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2} \quad (16)$$

gdje je  $C(k)$  autokovarijanca, a  $\sigma$  standardna devijacija.

Prema Denić-Jukić i ostali, (2020), točka prekida (*eng. truncation point*)  $m$  predstavlja domenu funkcije ili raspon vremenskog intervala u kojem se provodi analiza. Preporuka je da vrijednost varijable  $m$  ne prelazi vrijednost  $n/3$ , budući da se rezultati počinju mijenjati unutar raspona vrijednosti između  $n/3$  i  $n/2$ , a nakon  $n/2$  više nisu točni.

Kvantificiranje sličnosti između dvije različite vremenske serije podataka dobiva se kroz korištenje funkcije kros-korelacije (*CCF – eng. Cross correlation function*). Funkcija kros-korelacije (*CCF*) između dvije vremenske serije definirana je kao:

$$r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sigma_x \cdot \sigma_y}, \quad r_{yx} = \frac{C_{yx}(k)}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (17)$$

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x}) \cdot (y_{t+k} - \bar{y}), \quad k = 0, 1, 2, \dots, m \quad (18)$$

$$C_{yx}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (y_t - \bar{y}) \cdot (x_{t+k} - \bar{x}), \quad k = 0, 1, 2, \dots, m \quad (19)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2}, \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2} \quad (20)$$

gdje su  $C_{xy}$  i  $C_{yx}$  kovarijance, a  $\sigma_x$  i  $\sigma_y$  standardne devijacije dviju promatranih serija (Padilla & Pulido-Bosch, 1995; Larocque i ostali, 1998; Denić-Jukić i ostali, 2020).

Spektralna analiza, za razliku od analize u vremenskoj domeni, analizira signale u frekvencijskoj domeni. Tako funkcija spektralne gustoće  $S(f)$  predstavlja Fourierovu transformaciju autokorelacijske funkcije (Mangin, 1984; Larocque i ostali, 1998). Obje funkcije opisuju stacionarni stohastički proces koji pruža iste informacije, ali u različitoj domeni. Spektralnom funkcijom gustoće omogućuje se identifikacija periodičnih pojava, a diskretni oblik spektralne funkcije gustoće definira se kao (Larocque i ostali, 1998; Denić-Jukić i ostali, 2020):

$$S(f) = 2 \left[ 1 + 2 \sum_{k=1}^m D(k)r(k) \cos(2\pi fk) \right] \quad (21)$$

$$D(k) = \frac{1}{2} \left( 1 + \cos \frac{\pi k}{m} \right) \quad (22)$$

za frekvencije  $f = 1/2m, l = 0, 1, 2, \dots, m$ .

Funkcija kros-spektralne gustoće  $S_{xy}$  definira odnos između dva signala u frekvencijskoj domeni, za razliku od kros-korelacijske funkcije, koja definira odnos u vremenskoj domeni. Fourierova funkcija kros-spektralne gustoće je transformacija funkcije kros-korelacije i definira se kao kompozicija realnog dijela (*eng. co-spectrum*)  $\Lambda_{xy}(f)$  i imaginarnog dijela (*eng. quadrature spectrum*)  $\psi_{xy}(f)$  (Padilla & Pulido-Bosch, 1995; Larocque i ostali, 1998).

$$S_{xy}(f) = \psi_{xy}(f) - i\Lambda_{xy}(f) \quad (23)$$

$$\psi_{xy}(f) = 2 \left\{ r_{xy}(0) + \sum_{k=1}^m [r_{xy}(k) + r_{yx}(k)] D_k \cos(2\pi f k) \right\} \quad (24)$$

$$\Lambda_{xy}(f) = 2 \left\{ \sum_{k=1}^m [r_{xy}(k) - r_{yx}(k)] D_k \sin(2\pi f k) \right\} \quad (25)$$

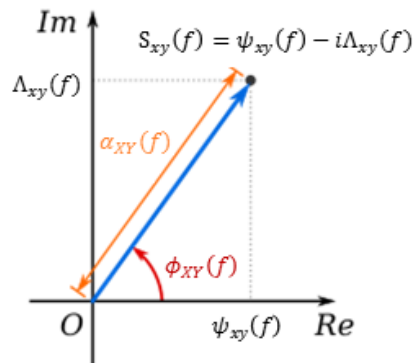
Ukoliko se kros-spektralnu funkciju gustoće promatra kao kompleksan broj, tada se funkcije amplitude  $\alpha_{xy}$  i faze  $\phi_{xy}$  mogu konstruirati korištenjem trigonometrijskog oblika kompleksnog broja (Slika 3.3).

$$\alpha_{XY}(f) = \sqrt{\psi_{xy}^2(f) + \Lambda_{xy}^2(f)} \quad (26)$$

$$\phi_{XY}(f) = \tan^{-1} \frac{\Lambda_{xy}(f)}{\psi_{xy}(f)} \quad (27)$$

Tada je alternativni zapis funkcije kros spektralne gustoće:

$$f_{xy}(w) = |\alpha_{XY}(w)| e^{-i\phi_{XY}(w)} \quad (28)$$



**Slika 3.3** Trigonometrijski prikaz kompleksnog broja u pravokutnom koordinatnom sustavu

Funkcija koherencije  $CO_{xy}$  i funkcija prigušenja ili pojačanja (*eng. Gain function*)  $G_{xy}$  mogu se definirati pomoću poznatih vrijednosti funkcija spektralne gustoće  $S_x$  i  $S_y$ , kao i funkcije kros-spektralne gustoće  $S_{xy}$  (Sujono i ostali, 2004; Chatfield, 2016):

$$CO_{xy}(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_x(f)S_y(f)} \quad (29)$$

$$G_{xy}(f) = \frac{|S_{xy}(f)|}{S_x(f)} \quad (30)$$

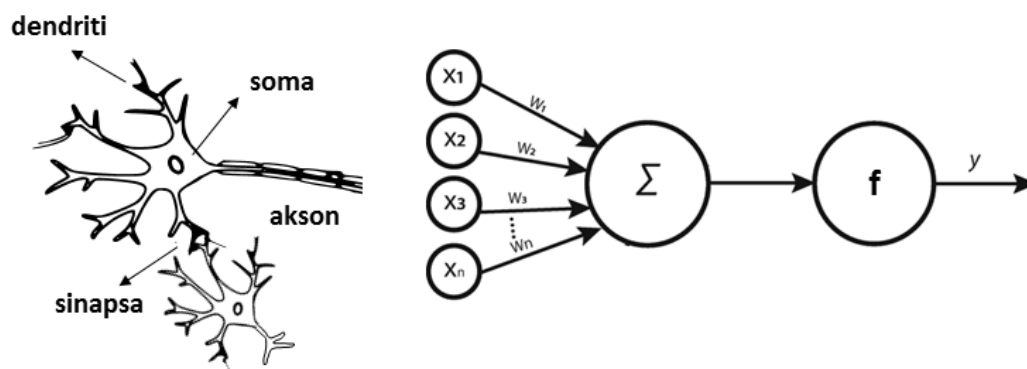
Funkcija koherencije  $CO_{xy}$  kvantificira linearni odnos između ulaznog i izlaznog signala. Vrijednost funkcije varira od 0 do 1, pri čemu vrijednost 0 implicira potpunu nekoreliranost, dok vrijednost 1 ukazuje na najveću korelaciju između signala pri frekvenciji  $f$ . Funkcija pojačanja opisuje pojačanje ( $G_{xy} > 1$ ) ili slabljenje ( $G_{xy} < 1$ ) izlaznog signala u odnosu na ulazni signal.

Funkcija amplitude  $\alpha_{xy}$ , prema Larocque i ostali (1998), identificira način na koji je sustav promijenio ulazni signal. Funkcija faze  $\phi_{xy}$  prikazuje vremensku razliku između signala koji su obrađeni. Na temelju funkcije faze moguće je definirati i prosječno zakašnjenje (*eng. mean delay*) koje je jednako nagibu linije trenda koja prolazi ishodištem koordinatnog sustava (Padilla & Pulido-Bosch, 1995).

$$d = \frac{\phi_{xy}(f)}{2\pi f} \quad (31)$$

### 3.1.6. Umjetne neuronske mreže

Umjetne neuronske mreže korištene su za nadomještanje nedostajućih podataka kod integralnih promjena volumena u Crvenom jezeru. Predstavljaju model umjetne inteligencije temeljen na skupu međusobno povezanih podataka koji simuliraju neurone u biološkom mozgu. Njihova primjena u različitim znanstvenim područjima omogućava analizu složenih sustava razlaganjem na jednostavnije komponente, čime se olakšava razumijevanje međusobnih povezanosti i ukupnog funkcioniranja promatranog sustava.



**Slika 3.4** Prikaz građe prirodnog neurona i umjetnog neurona s ulazima  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ , tijelom neurona ( $\Sigma$ ), prijenosnom funkcijom ( $f$ ) i izlazom  $y$

Osnovnu jedinicu umjetnih neuronskih mreža čine umjetni neuroni. Umjetni neuron predstavlja računalni model koji oponaša strukturu i funkciju prirodnog neurona, simulirajući način na koji prirodni neuroni primaju, obrađuju i prenose informacije (Slika 3.4). Prirodni neuron prima informacije putem dendrita, obrađuje ih unutar tijela neurona (soma) te ih zatim šalje dalje do drugih neurona putem aksona. Prijenos informacija, odnosno impulsa, vrši se preko sinapsi koje predstavljaju funkcionalne jedinice između završetka aksona prethodnog neurona i dendrita sljedećeg neurona. U slučaju umjetnog neurona, informacija, odnosno signal predstavljen numeričkom vrijednošću, dolazi u tijelo neurona preko ulaza koji su ponderirani, odnosno pomnoženi s odgovarajućim težinskim faktorom ( $w$ ). Tijelo umjetnog neurona zatim zbraja ponderirane ulaze te ih prijenosnom funkcijom ( $f$ ) obrađuje i prosljeđuje do izlaza, ili sljedećeg umjetnog neurona.

Rad umjetne neuronske mreže odvija se kroz fazu učenja i fazu testiranja. Faza učenja predstavlja iterativan postupak prikazivanja ulaznih primjera i očekivanih izlaza, pri čemu se prilagođava veličina težinskog faktora kako bi se poboljšala predviđanja izlaza (Dalbelo Bašić i ostali, 2011), dok faza testiranja predstavlja ključni korak u evaluaciji učinkovitosti modela nakon završetka procesa učenja.

Prije nego što započne proces učenja, važno je definirati model, uključujući ulazne i izlazne varijable, te prikupiti relevantne povijesne podatke na kojima će se mreža testirati. Također, niz podataka potrebno je podijeliti na podnizove, podniz za treniranje i podniz za testiranje, ili ako model prolazi i proces optimizacije, tada je potrebno definirati i podniz za konačnu validaciju podataka.

Ovisno o modelu neurona od kojeg su umjetne neuronske mreže građene i načinu prostiranja signala kroz mrežu, one se mogu podijeliti na statičke unaprijedne i dinamičke (Ujević Andrijić, 2019). Za nelinearne dinamičke procese najčešće se koriste višeslojne statičke mreže, dok se od dinamičkih mreža najčešće primjenjuju višeslojne mreže s elementima zadržke (Ujević Andrijić, 2019).

U ovom radu, korišten je model dinamičke nelinearne neuronske mreže, s obzirom na to da vrijednosti izlaznih varijabli u određenom trenutku ovise o ulazno-izlaznim vrijednostima iz prethodnih vremenskih intervala. Izlazne vrijednosti se predviđaju na temelju veze između ulaznih i izlaznih vrijednosti. Dinamički nelinearni model definiran je na sljedeći način:

$$y(t) = f(u(t - 1), y(t - 1), u(t - 2), y(t - 2), \dots) \quad (32)$$

gdje je  $f$  nelinearna funkcija,  $u(t)$  vrijednosti ulaznih varijabli i  $y(t)$  vrijednosti izlaznih varijabli. U ovom radu, analiza i implementacija umjetnih neuronskih mreža provedena je korištenjem MATLAB-a.

## 3.2. Hidrološke metode

Hidrološke metode predstavljaju temelj za analizu i razumijevanje krških sustava, koji su poznati po složenoj dinamici podzemne i površinske vode. Korištenje odgovarajućih modela omogućuje simulaciju ključnih hidroloških procesa, pružajući uvid u ponašanje vodnih resursa unutar ovih specifičnih okoliša. Izračun referentne evapotranspiracije ( $ET_0$ ) predstavlja bitan korak u tom procesu, jer su podaci o referentnoj evapotranspiraciji korišteni kao jedan od osnovnih ulaznih parametara za modeliranje otjecanja na izvoru Opačac i hidrološkoj postaji Kamenmost. U nastavku su opisane korištene metode izračuna  $ET_0$ , specifičnosti modeliranja u kršu te vrste primijenjenih modela.

### 3.2.1. Proračun referentne evapotranspiracije

Referentna evapotranspiracija ( $ET_0$ ) predstavlja isparavanje vode s referentne površine definirane kao referentni usjev trave s pretpostavljenom visinom usjeva od 0,12 m koja raste uz odgovarajuću količinu vode (Allen i ostali, 1998). Kao standardnu metodu za proračun referentne evapotranspiracije preporučuje se Penman-Monteithova metoda koja zahtjeva poznavanje podataka o sunčevom zračenju, temperaturi zraka, vlažnosti zraka i brzini vjetra. S obzirom na neraspoloživost svih navedenih podataka, prilikom izračuna referentne evapotranspiracije korišten je alternativan izračun  $ET_0$  prema Hargreaves-u (Allen i ostali, 1998):

$$ET_0 = 0.0023 \cdot (T_{mean} + 17,8) \cdot (T_{max} - T_{min})^{0.5} \cdot R_A \quad (33)$$

gdje je

$ET_0$  – referentna evapotranspiracija [mm/dan]

$T_{mean}$  – srednja dnevna temperatura zraka [°C]

$T_{max}$  – maksimalna dnevna temperatura zraka [°C]

$T_{min}$  – minimalna dnevna temperatura zraka [°C]

$R_A$  – sunčevo zračenje [MJ/m<sup>2</sup>/dan]

Srednja dnevna temperatura zraka za razdoblja od 24 sata definirana je kao srednja vrijednost dnevne maksimalne ( $T_{max}$ ) i minimalne temperature ( $T_{min}$ ), a ne kao prosjek satnih mjerenja temperature.

$$T_{mean} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (34)$$

Solarno ili izvanzemaljsko zračenje ( $R_A$ ) predstavlja količinu sunčevog zračenja koje dolazi do vrha Zemljine atmosfere prije nego što prođe kroz atmosferu (Allen i ostali, 1998). Ovo



zračenje mjeri se na horizontalnoj površini i predstavlja maksimalnu količinu sunčeve energije koja može stići do Zemlje. Solarno zračenje,  $R_A$ , definira se za svaki dan u godini i za različite geografske širine na temelju solarne konstante, solarne deklinacije i doba godine prema sljedećem izrazu (Allen i ostali, 1998):

$$R_A = \frac{24 \cdot 60}{\pi} \cdot G_{SC} \cdot d_r \cdot [\omega_s \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s] \quad (35)$$

gdje je

$R_A$  – sunčevo zračenje [MJ/m<sup>2</sup>/dan]

$G_{SC}$  – solarna konstanta = 0,082 MJ/m<sup>2</sup>/min

$d_r$  – inverzna relativna udaljenost između Zemlje i Sunca

$\omega_s$  – kut zalaska sunca [rad]

$\varphi$  – geografska širina [rad]

$\delta$  – solarna deklinacija [rad]

Inverzna relativna udaljenost Zemlje i Sunca, kut zalaska sunca, geografska širina te solarna deklinacija definiraju se prema izrazima:

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J\right) \quad (36)$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan \varphi \cdot \tan \delta] \quad (37)$$

$$\varphi = \frac{\pi}{180} \quad (38)$$

$$\delta = 0,409 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J - 1,39\right) \quad (39)$$

gdje je  $J$  broj dana u godini između 1. (1. siječnja) i 365. ili 366. (31. prosinca).

#### 3.2.2. Modeliranje u kršu i vrste modela

Modeliranje u kršu predstavlja složen proces opisivanja i predviđanja ponašanja hidroloških i geoloških sustava unutar krških područja. Primjenom hidroloških modela omogućava se simplifikacija stvarnog sustava (Kovács, 2003) s ciljem što realnijeg modeliranja kompleksne dinamike vode u kršu. Specifične karakteristike krša koje uključuju anizotropnost i heterogenost, kao i prisutnost zona različite propusnosti i kapaciteta, čine modeliranje izazovnim zadatkom koji zahtjeva temeljito poznavanje i razumijevanje krških sustava (Jourde & Wang, 2023). Adekvatno poznavanje krških sustava olakšava određivanje geometrije krša te odabir odgovarajućih hidroloških parametara što predstavlja prvi i najzahtjevniji korak pri modeliranju (Kovács, 2003).

Problemi koji se vežu uz modeliranje krških sustava uključuju korištenje velikog broja parametara, matematičkih zakona i numeričkih metoda, što model čini složenim, kao i problem usporedivosti simuliranih rezultata s vrijednostima stvarnog sustava (Király, 1994; Kovács, 2003). Naime, rezultati dobiveni modelom vrijede samo u domeni modela i sva uvedena pojednostavljena realnog sustava predstavljaju nesigurnost u rezultatima simulacije (Kovács, 2003), odnosno rezultati gube pouzdanost izvan raspona uvjeta za koji su kalibrirani (Hartmann, Goldscheider, i ostali, 2014).

Postoje različiti pristupi u modeliranju krških sustava, od determinističkih do stohastičkih modela, kao i različite razine prostorne i vremenske rezolucije. Ovisno o načinu tretiranja slučajnih varijabli, opisu fizikalnih procesa te o prostornoj distribuciji karakteristika sustava razlikuje se više vrsta modela.

S obzirom na način tretiranja slučajnih varijabli razlikuju se deterministički i stohastički modeli. Deterministički modeli ne uzimaju u obzir varijabilnost sustava već se temelje na uzročno posljedičnim vezama koje se opisuju fizikalnim zakonima i matematičkim jednadžbama (Yevjevich, 1987). Takvi modeli podrazumijevaju da sustav koji se modelira radi prema poznatim i fiksnim parametrima, bez varijacije parametara i ulaznih podataka. Izlaz takvog modela za isti početni skup uvjeta daje iste vrijednosti. Stohastički modeli, za razliku od determinističkih, uključuju slučajne varijable u strukturu modela čija se pojava ne može opisati matematičkim oblicima (Yevjevich, 1987). Izlaz stohastičkog modela za isti skup početnih uvjeta daje različite vrijednosti.

Prema kriteriju objašnjavanja procesa razlikuju se empirijski, konceptualni te fizikalni modeli. Empirijski ili black-box model predstavlja najjednostavniji model, izgrađen na promatranju ulaza i izlaza bez pokušaja eksplicitnog predstavljanja procesa pretvorbe (Hartmann,

Goldscheider, i ostali, 2014). Temelji se na matematičkim zakonitostima koji nisu direktno povezani s fizikalnim procesima i pruža ograničavajuće informacije o fizikalnim karakteristikama promatranog sustava (Kovács, 2003). Konceptualni ili grey-box modeli predstavljaju pojednostavljenije stvarnog sustava temeljenog na promatranim ili pretpostavljenim odnosima između promatranih varijabli (Liu i ostali, 2017). S obzirom da kombiniraju poznate ili determinističke komponente zajedno s empirijskim elementima ili elementima koji se temelje na podacima, konceptualni modeli su hibridi empirijskih i fizikalnih modela. Kod fizikalnih ili white-box modela funkcioniranje sustava je u potpunosti poznato, a temelji se na poznatim fizikalnim zakonima, načelima i zakonitostima uz procjenu velikog broja parametara koji opisuju fizičke karakteristike sustava (Singh, 2018).

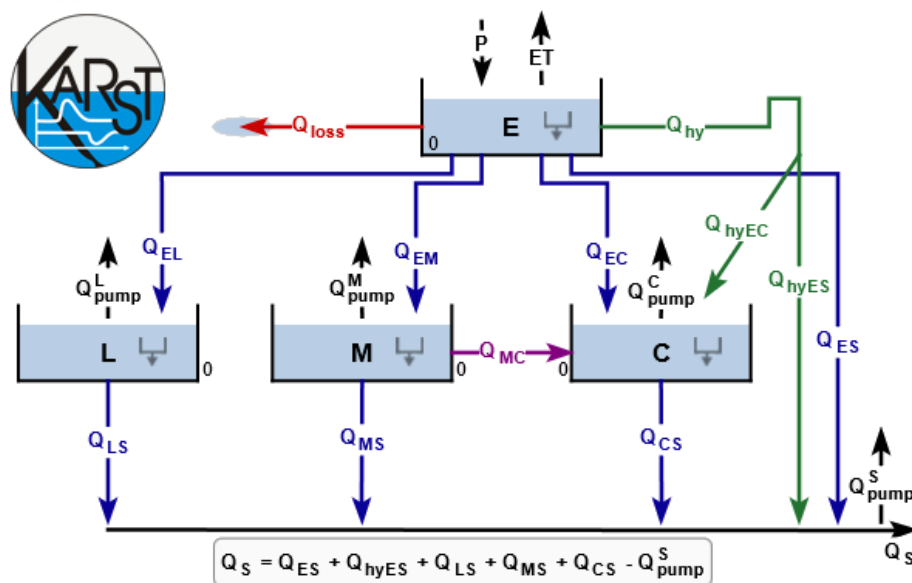
S obzirom na prostornu distribuciju karakteristika sustava razlikuju se objedinjeni (*eng. lumped*), distribuirani (*eng. distributed*) i poludistribuirani (*eng. semi-distributed*) modeli. Objedinjeni modeli podrazumijevaju konstantne parametre unutar područja promatranja, a odgovor sustava se procjenjuje samo na izlazu (Singh, 2018). Nasuprot tome, parametri kod poludistribuiranih modela djelomično variraju u prostoru dok parametri kod distribuiranih modela potpuno variraju u prostoru te je moguće promatranje hidroloških procesa u različitim prostornim točkama sustava (Singh, 2018).

Unatoč različitim numeričkim pristupima koji su predloženi u posljednjim desetljećima za simulaciju glavnih krških procesa, još uvijek nije razvijen sustavan i potpuno cjelovit numerički model koji bi u potpunosti opisao tokove i transportne procese u krškim vodonosnicima (Jourde & Wang, 2023).

U ovom radu, modeliranje hidrodinamike krškog vodonosnika analiziranog područja provedeno je s ciljem razumijevanja i predviđanja ponašanja složenih hidroloških i hidrogeoloških sustava. Respektirajući promjene u klimatskim obrascima, promatranje dinamike krškog vodonosnika zahtijeva razvoj modela temeljenih na postojećim saznanjima, kao i na mjerenim klimatološkim i hidrološkim podacima, koji omogućuju predviđanje budućih hidroloških uvjeta na temelju prognoziranih ulaznih parametara. Modeliranje je izvršeno korištenjem konceptualnog modela KARSTMOD te integralnog modela MIKE SHE, a u nastavku su navedene glavne karakteristike odabranih modela.

## KARSTMOD

KARSTMOD je računalni model osmišljen za simulaciju odnosa oborina i protoka (rainfall-runoff model) na krškom izvoru te za analizu hidrodinamike odjeljaka koji se razmatraju u modelu (Jourde i ostali, 2015; Mazzilli i ostali, 2019). Model se temelji na konceptualnom modelu krša uzimajući u obzir varijabilnost hidrodinamičkih svojstava komponenata krškog vodosnonika – epikrša, saturirane i nesaturirane zone te podsustava krške matrice i krških provodnika (Jourde i ostali, 2015). Jednostavnu strukturu modela, s ciljem izbjegavanja pretjerane parametrizacije modela, čine četiri odjeljka raspoređena na dvije razine (Jourde i ostali, 2015). Prvi odjeljak *E* smješten je na najvišoj poziciji, simulirajući ulazne procese u zoni epikrša, dok odjeljci *L*, *M* i *C*, smješteni ispod odjeljka *E*, simuliraju procese u saturiranoj zoni (Sivelle i ostali, 2019). Ovisno o odabranoj strukturi modela, moguće je deaktivirati sve odjeljke osim odjeljka *E* u kojem se vrši transformacija ulaznih podataka modela. Struktura modela pri aktivaciji svih dostupnih odjeljaka prikazana je na slici 3.5.



**Slika 3.5** Struktura modela u KARSTMODU pri aktivaciji svih dostupnih odjeljaka

Konfiguracija modela može biti klasična s konačnim karakterističnim vremenom prijenosa te neograničena s neograničenim karakterističnim vremenom prijenosa (Mazzilli i ostali, 2019). Neograničena vremenska funkcija primjenjiva je kod sustava koji koriste jedan odjeljak i uzimaju u obzir više vremenskih skala prijenosa (Mazzilli i ostali, 2019). Za svaki pojedini aktivni odjeljak modela moguć je zaseban odabir konfiguracije, a ovisno o odabiru konfiguracije aktiviraju se odgovarajući zakoni prijenosa.

Primjena KARSTMOD-a u modeliranju krških sustava, uključujući izvor Opačac, opravdana je njegovom sposobnošću analize odnosa oborina i otjecanja kroz jednostavan pristup temeljen na odjeljcima, bez potrebe za poznavanjem geometrije krškog sustava. KARSTMOD se pokazao učinkovitim u modeliranju krških izvora i vodonosnika (Guinot i ostali, 2015; Baudement i ostali, 2017; Mazzilli i ostali, 2019; Sivelles i ostali, 2019; Shirafkan i ostali, 2023), provođenju hidrodinamičkih analiza u svrhu kartiranja izvora onečišćenja (Kazakis i ostali, 2018) te procjeni doprinosa vadozne zone obnovi podzemne vode (Poulain i ostali, 2018).

#### *MIKE SHE*

MIKE SHE je integralni model za simulaciju hidroloških procesa u vodnim sustavima razvijen od Danskog hidrološkog instituta (DHI). Model pokriva glavne procese u hidrološkom ciklusu i uključuje modele za izračun evapotranspiracije, modeliranje površinskog toka, toka u vodotocima, toka u nesaturiranoj i saturiranoj zoni te njihovih međusobnih interakcija (Graham & Butts, 2005; Prucha i ostali, 2016; DHI Water & Environment, 2017). Svaki proces može se prikazati na različitim razinama prostorne distribucije i složenosti, u skladu s dostupnošću podataka i s ciljevima modeliranja (DHI Water & Environment, 2017). Podržava integraciju s drugim modelima i alatima za simulaciju okoliša, omogućujući holistički pristup upravljanju vodnim resursima i zaštiti okoliša.

MIKE SHE model spada u kategoriju determinističkih, fizikalnih i distribuiranih modela, a razvijen je kao alternativa objedinjenom rainfall-runoff modelu (Graham & Butts, 2005). Kombinira distribuirani pristup s fizički utemeljenim jednadžbama, omogućujući detaljno i precizno modeliranje hidroloških procesa na različitim prostornim i vremenskim skalama. Korištenje fizički utemeljenih jednadžbi omogućava uključivanje izmjerenih vrijednosti parametara direktno u model (Graham & Butts, 2005). Ipak, postoje neka ograničenja primjene ovakvih fizikalno utemeljenih modela kao što su (Graham & Butts, 2005; DHI Water & Environment, 2017; Sekulić i ostali, 2017):

- *Značajna količina podataka:* Ovi modeli zahtijevaju veliku količinu podataka, a troškovi prikupljanja podataka mogu biti izrazito visoki.
- *Dulje vrijeme izvođenja:* Izvršavanje modela može biti dugotrajno zbog relativne složenosti fizikalno utemeljenih matematičkih rješenja koje koriste.
- *Prekomjerno parametriziranje:* Za jednostavne primjene, kompleksnost fizikalno utemeljenih modela može rezultirati prekomjernim brojem parametara, što može biti nepotrebno i otežati kalibraciju.

- *Primjenjivost modela:* Fizikalno utemeljeni modeli pokušavaju reprezentirati hidrološke procese na prostornoj skali matematičkim opisima koji su, u najboljem slučaju, valjani za uvjete malih eksperimentalnih razmjera, što može ograničiti njihovu primjenu na većim prostornim razmjerima.

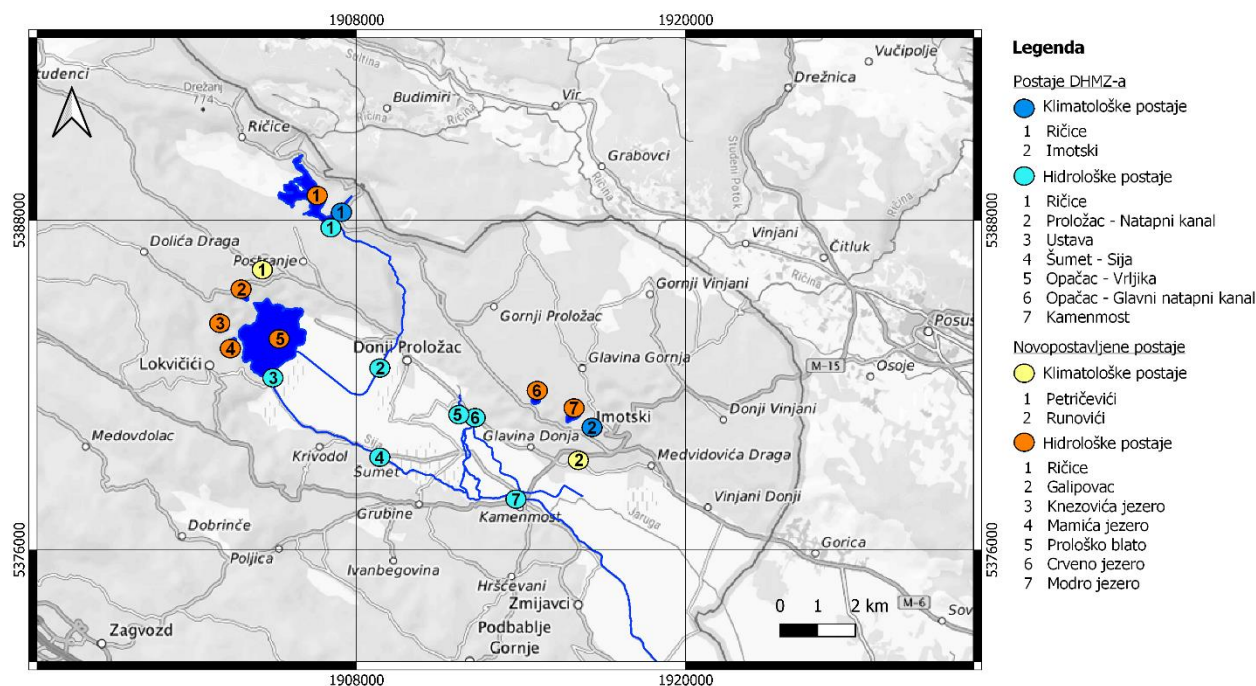
Stoga je u modeliranju krških vodonosnika često potrebno pojednostaviti opise procesa jer obično jedan ili dva glavna hidrološka procesa dominiraju u ponašanju sustava. Na primjer, prilikom prognoze poplava ključni su protok rijeke i površinsko otjecanje što znači da nije uvijek nužno koristiti detaljne, fizikalno utemeljene metode za sve procese (Graham & Butts, 2005). Umjesto toga, razuman pristup je primijeniti fizikalno utemeljene metode za važnije procese, dok se za manje važne procese koriste jednostavnije i brže metode.

Odabir MIKE SHE modela za modeliranje krškog vodonosnika šireg područja Imotskog polja temelji se na njegovoj sposobnosti da, u usporedbi s drugim modelima, bolje opisuje prostornu heterogenost krša i kompleksne podzemne-površinske hidrološke procese (Ma i ostali, 2016). Osim toga, pokazao se kao učinkovit alat za modeliranje područja s gustom riječnom mrežom i područja gdje dominiraju podzemne vode (Ma i ostali, 2016). U usporedbi s KARSTMOD-om, simulacija interakcije hidroloških procesa zahtijeva integraciju različitih izvora podataka koji uzimaju u obzir prostornu varijaciju karakteristika unutar sliva, što zahtijeva poznavanje mnogo većeg broja podataka. MIKE SHE je ujedno i jedan od najčešće korištenih fizički baziranih distribuiranih hidroloških modela koji se uspješno koristi za modeliranje krških vodonosnika (Doummar i ostali, 2012; Dubois i ostali, 2020), simulaciju kretanja podzemnih voda (Hartmann i ostali, 2015), procjenu utjecaja promjena u korištenju zemljišta na hidrologiju sliva (Im i ostali, 2009) i druge primjene.

### 3.3. Sustavi monitoringa

Sustave monitoringa čine postojeće klimatološke i hidrološke postaje Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ) te novopostavljene postaje instalirane uspostavom sustava za praćenje fizikalno-kemijskih i klimatskih parametara na širem području Imotske krajine. Lokacije svih mjernih postaja prikazane su na slici 3.6.

Postojeće klimatološke postaje DHMZ-a na području interesa su postaje Imotski i Ričice-Brana. Postaja Imotski nalazi se u samom središtu grada Imotskog na nadmorskoj visini od 399 m, dok se postaja Ričice-Brana nalazi se na istoimenoj akumulaciji na nadmorskoj visini od 402 m. Hidrološke postaje uključuju ukupno sedam mjernih postaja. Na rijeci Vrljici nalaze se postaje Kamenmost, Opačac - Glavni natapni kanal i Opačac – Vrljika, na vodotoku Siji postaje Šumet te Ustava na izlazu iz Prološkog blata i na vodotoku Suvaje mjerna postaja Proložac-Natapni kanal. Uz mjerne postaje na vodotocima, analiza uključuje i hidrološku postaju Ričice smještenoj na akumulaciji Ričice. Pregled svih postojećih klimatoloških i hidroloških postaja DHMZ-a s osnovnim informacijama o postajama prikazan je u Tablici 3.1.



**Slika 3.6** Pregledna karta s lokacijama postaja (Osnovna karta: WMS TopPlusOpen)

Novouspostavljeni monitoring sustav uključuje hidrološke postaje za praćenje vodostaja i fizikalno-kemijskih parametara vode (električna vodljivost i temperatura) na sedam mjernih točaka (Crveno jezero, Modro jezero, Ričice, Prološko blato, Galipovac, Mamića jezero, Knezovića jezero) te dvije postaje (Runovići i Petričevići) za praćenje klimatskih parametara.

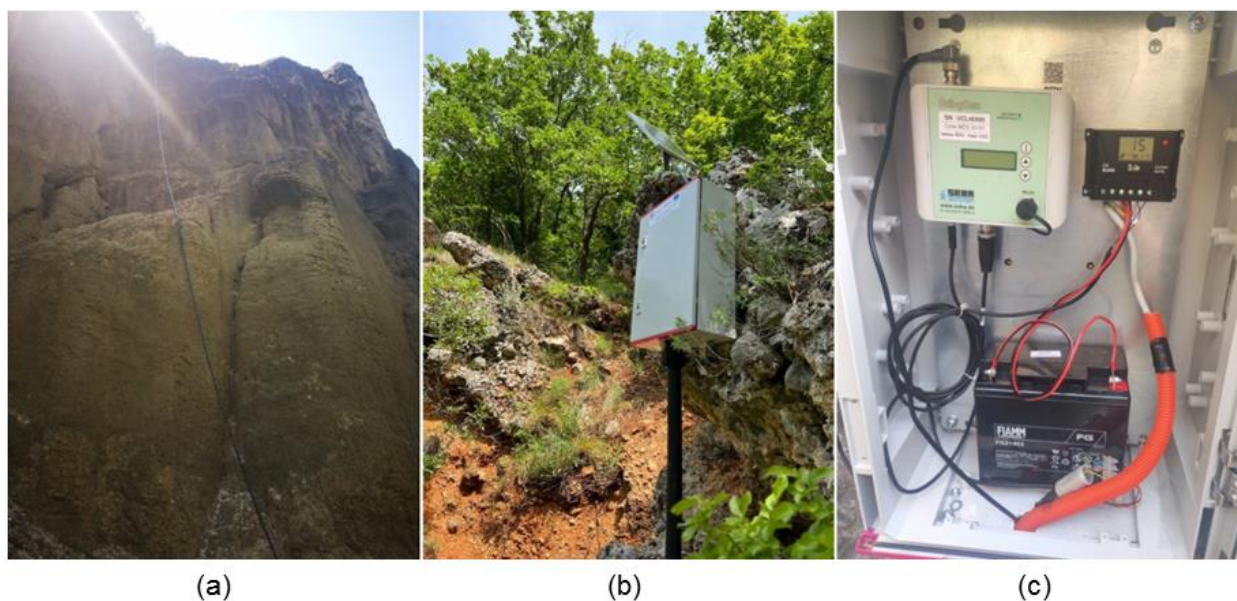
Parametri koji se bilježe na novouspostavljenim klimatološkim postajama su temperatura, tlak i vlažnost zraka, količina oborina, smjer i brzina vjetra te količina sunčeva zračenja.

**Tablica 3.1** Pregled postojećih klimatoloških i hidroloških postaja DHMZ-a

| <b>Klimatološke</b>           | <b>Geografska<br/>širina</b> | <b>Geografska<br/>dužina</b> | <b>Nadmorska visina<br/>(m)</b> |
|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| Imotski                       | 43°26'41,1" N                | 17°13'17,2" E                | 399                             |
| Ričice                        | 43°29'48" N                  | 17°08'02,4" E                | 402                             |
| <b>Hidrološke</b>             | <b>x</b>                     | <b>y</b>                     | <b>Kota nule (m n.m.)</b>       |
| Ričice                        | 43°29'46,1" N                | 17°7'57,6" E                 | 367,5                           |
| Proložac – Natapni kanal      | 43°27'39,1" N                | 17°8'47,9" E                 | 279,765                         |
| Ustava – Prološko Blato       | 43°27'35,2" N                | 17°6'41,7" E                 | 269,071                         |
| Šumet - Sija                  | 43°26'28,3" N                | 17°8'52" E                   | 267,829                         |
| Opačac – Vrljika              | 43°26'56" N                  | 17°10'39,7" E                | 266,204                         |
| Opačac – Glavni natapni kanal | 43°26'54,4" N                | 17°10'41,6" E                | 266,297                         |
| Kamenmost                     | 43°25'52,1" N                | 17°11'54,7" E                | 259,694                         |

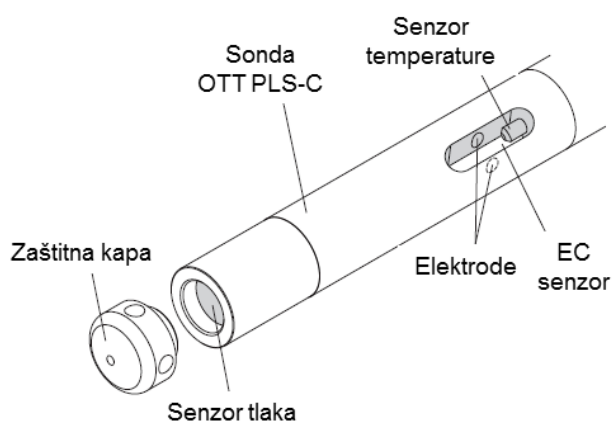
Uspostavljeni sustav je automatizirani integrirani sustav sastavljen od senzora za detekciju parametara, sinkroniziran u pogledu vremenskog prikupljanja podataka te energetski neovisan zahvaljujući napajanju solarnim panelima (Slika 3.7). Uzorkovanje praćenih parametara vrši se u satnoj rezoluciji, a instalirani telemetrijski sustavi omogućavaju odašiljanje podataka u stvarnom vremenu na uspostavljenu bazu podataka. Praćenje i pristup podacima u stvarnom vremenu omogućeno je putem uspostavljene web platforme, što omogućuje korisnicima brz i jednostavan uvid u kretanje pojedinih parametara u vodotocima u polju te u jezerima okolnog krškog masiva. S obzirom na iznimno nepristupačan i surov teren u jezerima krškog masiva, instalacija i uspostava mjernih postaja zahtijevala je angažman stručnjaka obučenih za rad u takvim uvjetima.





**Slika 3.7.** Instalacija mjernih postaja: (a) spuštanje kabela u Modrom jezeru, (b) dojavna stanica sa solarnim panelom u jezeru Galipovac, (c) unutrašnjost dojavne stanice instalirane u Crvenom jezeru

Svaka postaja opremljena je s limnigrafom, dojavnim sustavom, solarnim panelom, baterijom i regulatorom napajanja. Vrsta limnigrafa je višeparameterska sonda, kod Crvenog i Modrog jezera SEBA MPS-PTEC s dojavnom stanicom UniLogCom, dok kod ostalih postaja OTT PLS-C s dojavnim sustavom ADOS MKM2018. Višeparameterske sonde (Slika 3.8) mjere razinu vode, temperaturu i električnu vodljivost, dok je dodatno na temelju podataka o električnoj vodljivosti moguće dobiti i parametre saliniteta i ukupnih otopljenih tvari.



**Slika 3.8** Građa višeparameterske sonde OTT PLS-C (Izvor: Operating instructions, Pressure Probe with Conductivity Sensor OTT PLS-C)

Razina vode bilježi se pomoću mjerne ćelije koja mjeri hidrostatski tlak vodenog stupca, dok kapilare za kompenzaciju tlaka smještene unutar mjerne ćelije primaju informacije o trenutnom tlaku zraka uklanjajući moguće netočnosti u mjerenjima koje bi mogle proizaći iz fluktuacija atmosferskog tlaka. Električna vodljivost mjeri se mjernom ćelijom s četiri elektrode s integriranim senzorom temperature koji uzima u obzir varijacije temperature osiguravajući precizna mjerenja vodljivosti u različitim uvjetima okoline. Mjerenje temperature vrši se pomoću senzora smještenog unutar sonde. Vrijednosti parametra ukupnih otopljenih tvari dobivaju se množenjem vrijednosti električne vodljivosti s odgovarajućim faktorom provodljivosti (EC faktor). Ovaj faktor varira ovisno o proizvođaču sonde i dizajnu uređaja. Za višeparametarsku sondu SEBA MPS-PTEC, EC faktor iznosi 0,67, dok za OTT PLS-C sondu taj faktor iznosi 0,64.

## 4. KLIMATOLOŠKA I HIDROLOŠKA ANALIZA

### 4.1. Klimatološka analiza

Klimatološka analiza obuhvaća analizu temperatura i oborina s klimatoloških postaja Imotski i Ričice-Brana (u nastavku Ričice). Period razmatranja je od početka mjerenja do zaključno sa 2021. godinom. Raspoloživi podaci na postaji Imotski su od 1981. godine, a na postaji Ričice od 1993. godine. Temperaturna analiza uključuje analizu srednjih mjesečnih i srednjih godišnjih vrijednosti temperatura, kao i analizu kretanja ekstrema – godišnjih minimuma i maksimuma. Analiza oborina obuhvaća analizu minimalnih, srednjih i maksimalnih količina oborina na mjesečnoj razini i analizu ukupnih godišnjih oborina. Duljina raspoloživih vremenskih serija podataka na dvije postaje nije jednaka, kao ni broj nedostajućih podataka. Tako se na postaji Imotski ne raspolaže s podacima srednjih godišnjih temperatura za 2004. i 2020. godinu te s podacima minimalnih godišnjih temperatura za 2008. i 2020. godinu, dok je serija maksimalnih godišnjih temperatura kompletna. Serija minimalnih godišnjih temperatura za postaju Ričice je kompletna, dok podaci o srednjim i maksimalnim godišnjim temperaturama za 1993. godinu nedostaju. Metode mjerenja srednjih dnevnih temperatura i temperaturnih ekstrema se razlikuju što rezultira različitim prazninama u serijama podataka.

Srednja godišnja temperatura prosjek je srednjih mjesečnih temperatura, dok je srednja mjesečna temperatura prosjek srednjih dnevnih temperatura. Srednja dnevna temperatura zraka računa se korištenjem izraza, najčešće korištenog u istočnim europskim zemljama (Weiss & Hays, 2005; Bonacci, Željковиć, Trogrlić, i ostali, 2013; Bonacci & Željковиć, 2018; Bezak i ostali, 2020; Gough i ostali, 2020):

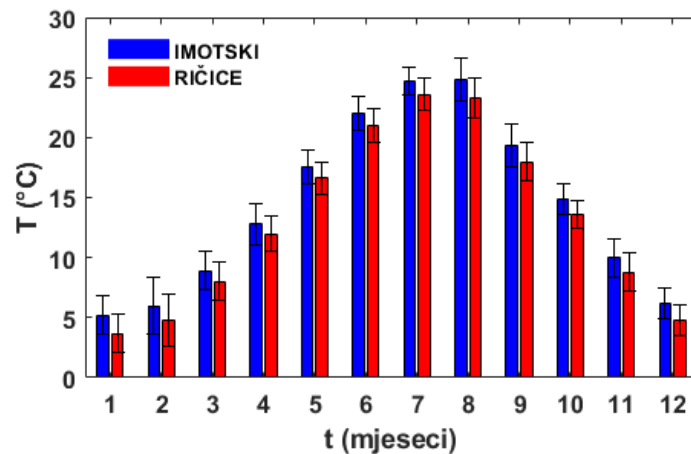
$$T_{sr} = \frac{T_7 + T_{14} + 2 \cdot T_{21}}{4} \quad (40)$$

gdje su  $T_7$ ,  $T_{14}$  i  $T_{21}$  vrijednosti temperature mjerene redom u 7, 14 i 21 sat po lokalnom vremenu.

Dnevne minimalne i maksimalne temperature očitavaju se na termometrima u meteorološkoj kućici na 2 m iznad tla u 21 po lokalnom vremenu (LV) i odnose se na razdoblje od 21 LV prethodnoga dana do 21 LV na dan očitavanja (tj. na prethodna 24 sata) (Državni hidrometeorološki zavod, 2008).

#### 4.1.1. Analiza temperature zraka

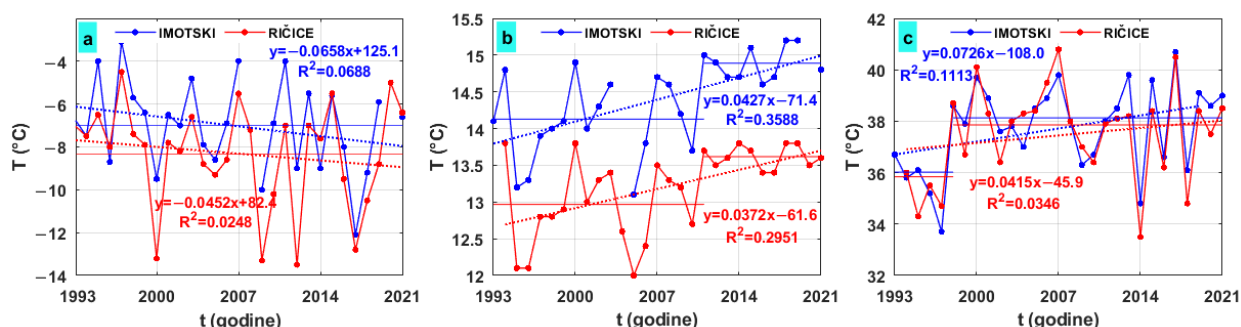
Dinamika temperature zraka analizirana je na različitim prostornim i vremenskim skalama. Analiza dugih vremenskih serija podataka koja uključuje karakteristične vrijednosti minimuma, srednjih vrijednosti i maksimuma temperatura ključne su za razumijevanje varijabilnosti klime, detektiranja utjecaja klimatskih promjena i odabira odgovarajućih mjera za smanjenje utjecaja klimatskih promjena. Analiza je provedena na dostupnim podacima, uzimajući u obzir nejednaku duljinu serija podataka na dvije promatrane postaje. Iz tog razloga, napravljena je analiza podataka za raspoložive vremenske periode na objema postajama, dok je usporedba karakterističnih vrijednosti temperatura provedena za vremenske periode koji se međusobno preklapaju (1993-2021).



**Slika 4.1** Prikaz srednjih mjesečnih temperatura i standardnih devijacija na postajama Imotski i Ričice

Analiza srednjih mjesečnih temperatura ukazuje na više vrijednosti temperatura na postaji Imotski nego na Ričicama (Slika 4.1), što se može pripisati geografskom položaju postaja uslijed razlike u nadmorskoj visini postaja. Temperaturne razlike variraju od mjeseca do mjeseca, a najmanje su u proljetnim mjesecima. Najviša srednja mjesečna vrijednost temperature od 24,8 °C

bilježi su na postaji Imotski u kolovozu, dok je najviša srednja mjesečna vrijednost temperature na postaji Ričice u srpnju i iznosi 23,6 °C. Najniža srednja mjesečna vrijednost bilježi u siječnju i iznosi 5,2 °C na postaji Imotski i 3,7 °C na postaji Ričice.



**Slika 4.2** Prikaz godišnjih (a) minimalnih, (b) srednjih i (c) maksimalnih temperatura na postajama Imotski i Ričice

Slika 4.2 prikazuje usporedbu karakterističnih vrijednosti temperatura na dvjema postajama za period od 1993. do 2021. godine, dok su u Tablici 4.1 prikazane magnitude trenda za sve karakteristične temperature kao i rezultati M–K testa. Trendovi koji su okarakterizirani kao statistički značajni označeni su sa \*.

**Tablica 4.1** Magnitude trenda ( $\beta$ ) i rezultati M–K testa ( $p$ ) za serije godišnjih minimalnih, srednjih i maksimalnih temperatura na postaji Imotski (IM) i Ričice (RI) u period od 1993. do 2021. godine

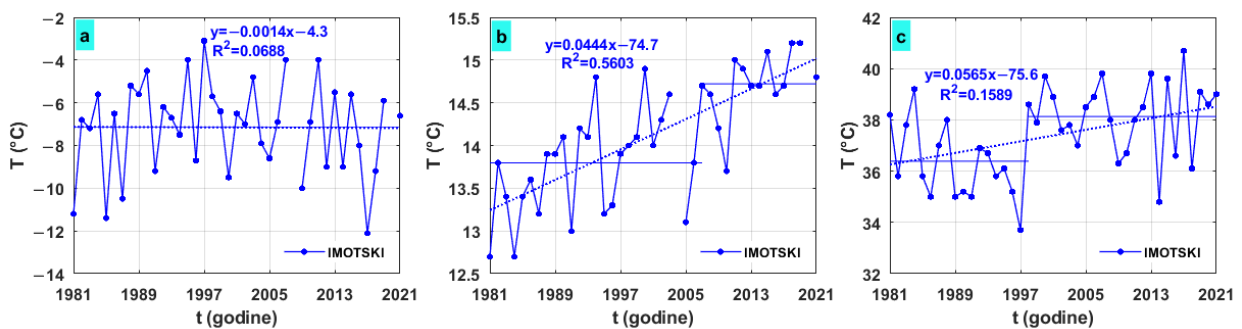
| T (°C) | magnituda trenda ( $\beta$ ) |         | M–K-test ( $p$ )        |                         |
|--------|------------------------------|---------|-------------------------|-------------------------|
|        | IM                           | RI      | IM                      | RI                      |
| min    | -0,0667                      | -0,0510 | 0,0721                  | 0,4092                  |
| mean   | 0,0437                       | 0,0387  | $9,88 \times 10^{-4}$ * | $7,10 \times 10^{-6}$ * |
| max    | 0,0813                       | 0,0383  | 0,1131                  | 0,1650                  |

\*statistički značajan trend

Analiza minimalnih temperatura je pokazala da je prosječna godišnja minimalna temperatura na postaji Imotski -7 °C, dok je na postaji Ričice -8,3 °C. Raspon minimalnih temperatura na postaji Imotski je od -3,1 °C do -12,1 °C, dok je na postaji Ričice od -4,5 °C do -13,5 °C. Obje postaje bilježe negativan trend minimalnih godišnjih temperatura. Negativan trend je izraženiji na postaji Imotski što je evidentno i iz vrijednosti magnituda trenda ( $\beta$ ) koja je za postaju Imotski -0,0667, a za postaju Ričice -0,0510. Iako negativan trend postoji, on nije statistički značajan ( $p > 0,05$ ) ni na jednoj postaji. Rezultati SNHT testa ukazali su da nema promjena u srednjoj vrijednosti.

Srednja godišnja temperatura na postaji Imotski je bila u rasponu od 13,1 °C do 15,2 °C s prosječnom vrijednošću od 14,4 °C, dok je na postaji Ričice varirala od 12 °C do 13,8 °C s prosjekom od 13,2 °C. Na obje postaje je kod srednjih godišnjih temperatura uočen statistički značajan uzlazni trend ( $p < 0,05$ ), a magnitude trenda ukazuju na približno sličan trend porasta (Tablica 4.1). SNHT testom na obje postaje je zamijećen pomak u srednjoj vrijednosti nakon 2011. godine (Slika 4.2b) i taj pomak je sukladno rezultatima t-testa statistički značajan ( $p < 0,05$ ).

Maksimalne godišnje temperature na postajama Imotski i Ričice kreću se u sličnim rasponima. Tako je maksimalna godišnja temperatura na postaji Imotski varirala od 33,7 °C do 40,7 °C s prosjekom od 37,7 °C, dok je na postaji Ričice raspon maksimalnih godišnjih temperatura bio od 33,5 °C do 40,8 °C s prosječnom maksimalnom temperaturom od 37,5 °C. Kao i kod srednjih godišnjih temperatura, maksimalne godišnje temperature imaju uzlazan trend na obje postaje. Uzlazni trend je izraženiji na postaji Imotski, što je vidljivo i iz znatno više vrijednosti magnitude trenda u usporedbi s postajom Ričice (Tablica 4.1). Iako uzlazni trendovi postoje na obje postaje, prema rezultatima M–K-testa oni nisu statistički značajni ( $p > 0,05$ ). Rezultat SNHT testa ukazuje na promjenu srednje vrijednosti na obje postaje nakon 1998. godine. T-test pokazao je da je pomak u srednjoj vrijednosti statistički značajan ( $p < 0,05$ ).



**Slika 4.3** Godišnje minimalne (a), srednje (b) i godišnje maksimalne (b) temperature zraka na postaji Imotski u periodu od 1981. godine do 2021.

Analizom cjelokupnog niza podataka na postaji Imotski utvrđeno je da je prosječna godišnja temperatura 14,1 °C, prosječna godišnja minimalna temperatura  $-7,2$  °C i prosječna maksimalna godišnja temperatura 37,4 °C. Usporedbom karakterističnih vrijednosti u periodu od 1981. godine sa podacima od 1993. godine, uočeno je smanjenje prosječne minimalne godišnje temperature kao i povećanje prosječne godišnje temperature i prosječne godišnje maksimalne temperature. Temperaturni trendovi su jednaki kao i za prethodno analizirano razdoblje i uključuju silazni trend kod minimalnih godišnjih temperatura te uzlazni trend srednjih godišnjih i maksimalnih godišnjih temperatura (Slika 4.3). Statistički značajan trend bilježi se kod srednjih godišnjih i maksimalnih godišnjih temperatura (Tablica 4.2). Kao i kod analize podataka od 1993.

godine, SNHT testom utvrđen je pomak u srednjoj vrijednosti kod maksimalnih godišnjih temperatura nakon 1998. godine. Kod srednjih godišnjih temperatura pomak u srednjoj vrijednosti bilježi se nakon 2007. godine. T-testom utvrđeno je da su oba pomaka statistički značajna ( $p < 0,05$ ).

**Tablica 4.2** Magnitude trenda ( $\beta$ ) i rezultati M–K testa ( $p$ ) za seriju godišnjih minimalnih, srednjih i maksimalnih temperatura na postaji Imotski u period od 1981. do 2021. godine

| T (°C)     | magnituda trenda ( $\beta$ ) | M–K-Test ( $p$ )        |
|------------|------------------------------|-------------------------|
| minimalne  | –0,0050                      | 0,7670                  |
| srednje    | 0,0437                       | $3,76 \times 10^{-7}$ * |
| maksimalne | 0,0590                       | 0,0131*                 |

\*statistički značajan trend

Temperaturni trendovi uočeni na postajama Imotski i Ričice pokazuju podudarnost s trendovima uočenim na regionalnoj i nacionalnoj razini. Tako su najznačajnije promjene uočene u srednjim godišnjim temperaturama. Prema Petom nacionalnom izvješću Republike Hrvatske prema Okvirnoj konvenciji Ujedinjenih naroda o promjeni klime (UNFCCC) (Branković i ostali, 2009), u kojem je provedena analiza dugogodišnjih meteoroloških mjerenja na postajama u različitim klimatskim područjima, uočen je statistički značajan porast srednjih godišnjih temperatura na četiri od pet analiziranih postaja u 108-godišnjem razdoblju. Postaje koju su bile obuhvaćene analizom su Osijek, Zagreb-Grič, Gospić, Crikvenica i Hvar. Jedina postaja na kojoj nije zabilježen statistički značajan porast u promatranom razdoblju je postaja Osijek. Istraživanja na ostalim postajama u regiji, kao što su Hvar, Komiža i Split, također su ukazala na statistički značajan trend porasta srednjih godišnjih temperatura (Bonacci i ostali, 2020; Bonacci, Bonacci, Patekar, i ostali, 2021). Na postajama Hvar i Split statistički značajan uzlazni trend pojavljuje se u razdoblju od 1992.-2019. godine (Bonacci, Bonacci, Patekar, i ostali, 2021), što se poklapa sa statističkim značajnim trendovima u maksimalnim godišnjim temperaturama uočenim na postajama Imotski i Ričice nakon 1998. godine te kod srednjih godišnjih temperatura na istim postajama nakon 2007., odnosno 2011. godine. Postaje na otocima Biševo, Lastovo i Palagruža također bilježe statistički značajne uzlazne trendove kod srednjih godišnjih i maksimalnih godišnjih temperatura (Bonacci, 2019; Bonacci i ostali, 2020). U razdoblju od 1951. do 2010. statistički značajan porast srednjih godišnjih temperatura evidentiran je duž hrvatskog obalnog područja, dok je najintenzivniji porast evidentiran u razdoblju od 2001. do 2010. godine kada je zabilježeno pet do sedam od deset najtoplijih godina od sredine dvadesetog stoljeća (Branković i ostali, 2013). Statistički značajni uzlazni trendovi uočeni su i na postaji Zagreb-Grič u

kontinentalnom dijelu Hrvatske kod srednjih godišnjih, ali i maksimalnih godišnjih temperatura (Bonacci, Bonacci, & Roje-Bonacci, 2021). Istraživanja Perčec Tadić i ostalih (2023) ukazuju na izraženije temperaturne trendove u kontinentalnim, planinskim dijelovima Hrvatske nego u obalnom području. Također uočavaju nedostatak pojave pojačanog zagrijavanja porastom nadmorske visine na visinama od 750 do 1594 m, uočenim na nekim drugim planinskim lancima (Pepin i ostali, 2015). Naprotiv, zamjećuju slične ali i izraženije trendove i na postajama na nižim nadmorskim visinama. S obzirom da analizirane postaje Imotski i Ričice, uz mediteransku klimu imaju i utjecaj kontinentalne klime, moguće je prethodno iznesena saznanja povezati s istima. Rezultati dobiveni analizom raspoloživih nizova podataka na navedene dvije postaje u skladu su s regionalnim trendovima zatopljenja uočenim u Hrvatskoj i na zapadnom Balkanu (Bonacci, 2010, 2012; Branković i ostali, 2013). Navedeni rezultati ukazuju na prisutnost statistički značajnih godišnjih trendova od druge polovice 1990-ih do kraja 21. stoljeća (Branković i ostali, 2013; Bonacci, 2019; Bonacci, Bonacci, & Roje-Bonacci, 2021; Perčec Tadić i ostali, 2023).

#### 4.1.2. Analiza oborina

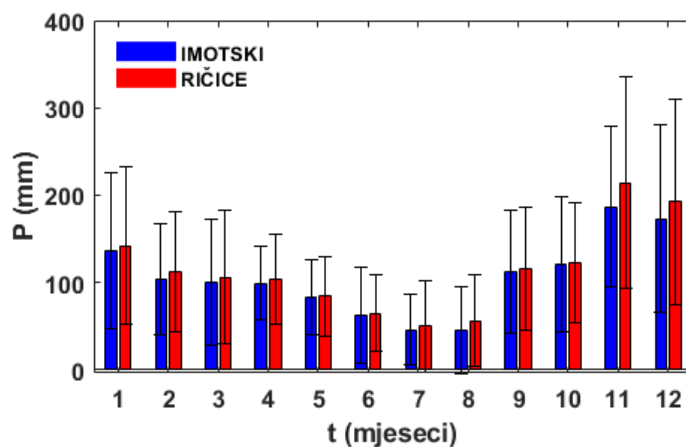
Oborine, zajedno s temperaturom, predstavljaju jedan od ključnih faktora za prognozu vremena i kontinuirano praćenje klime. Također su od iznimne važnosti za razumijevanje varijabilnosti klime, analizu pojavnosti elementarnih nepogoda poput suša i poplava, ali i za proučavanje dostupnosti vode, posebice u krškim regijama poput Imotskog polja i okolice. Analiza oborina obuhvaća analizu prosječnih mjesečnih količina oborina, analizu godišnjih oborinskih trendova te prostornog rasporeda oborina. Varijabilnost oborina analizirana je korištenjem parametara koeficijenta varijacije (CV), standardizirane anomalije oborina (SRA) i indeksa koncentracije oborina (PCI).

##### *Analiza oborina na mjesečnoj razini*

Prosječna mjesečna količina oborina najveća je u studenom sa 186,2 mm na postaji Imotski i 214,2 mm na postaji Ričice, dok je najmanje oborina zabilježeno u srpnju sa 45,3 mm u Imotskom i 49,5 mm na Ričicama (Slika 4.4). Srednje mjesečne vrijednosti oborina su općenito više na postaji Ričice, pri čemu su razlike relativno ujednačene, osim u studenom i prosincu kada se primjećuju značajno veće količine oborina na postaji Ričice, čemu doprinosi i blizina slobodnoj vodnoj površini koja povećava sadržaj vlage u zračnim masama (Bonacci, 1994). Povećana količina oborina tijekom zimskih mjeseci odražava se na poplave u Imotskom polju, gdje, osim oborina, ključnu ulogu igraju i podzemne vode, s obzirom na to da je polje podsustav šireg krškog masiva, a prave granice sliva su uglavnom podzemne, a rijetko samo topografske (Ljubenković,



2015). Ovakva sezonska raznolikost, s manjom količinom oborina tijekom toplijih mjeseci te obilnijim oborinama tijekom hladnijih mjeseci karakteristika je maritimnog režima oborina.



**Slika 4.4** Prikaz prosječne mjesečne količine oborina i standardnih devijacija na postajama Imotski i Ričice

U tablici 4.3 dan je pregled minimalnih, srednjih i maksimalnih prosječnih oborina na postajama Imotski i Ričice za razdoblje od 1993. do 2021. godine. Uz navedeno, dan je i pregled koeficijenta varijacije kako bi se prikazala varijabilnost srednjih mjesečnih oborina. Na postaji Ričice studeni je najkišovitiji mjesec u kojem se javljaju najveći minimum i maksimum oborina. Iako se na postaji Imotski maksimalna količina oborina bilježi u prosincu, ipak je srednja količina oborina najviša u studenome kada se bilježi i najveći minimum oborina. Primjećuje se smanjenje odstupanja u srednjim maksimalnim količinama oborina na južnom Jadranu (Branković i ostali, 2013), što rezultira time da postaje na južnom Jadranu bilježe najviše oborina tijekom prosinca. Dakle, nije slučajnost da postaja Imotski bilježi najznačajnije količine oborina upravo u prosincu.

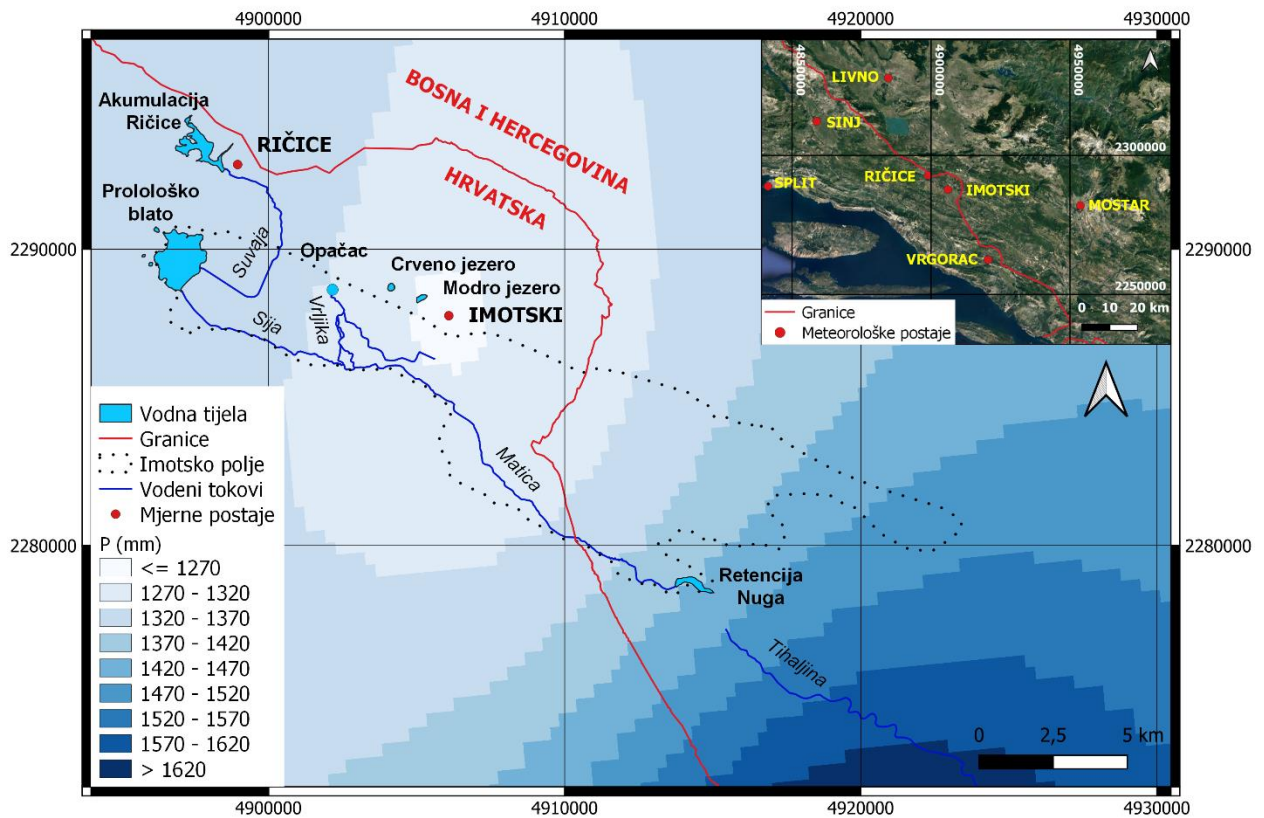
Koeficijent varijacije (CV) izračunat je na temelju srednjih mjesečnih vrijednosti oborina. Izračunati koeficijenti varijacije ukazuju na značajno osciliranje mjesečnih količina oborina, dok je najizraženija varijabilnost oborina izražena u ljetnim mjesecima. S obzirom na vrijednosti koeficijenta varijacije koji su na mjesečnoj razini iznad vrijednosti 30, zaključuje se da je varijabilnost oborina na mjesečnoj razini visoka. Analizom prosječnih godišnjih vrijednosti oborina dobiveni su vrijednosti koeficijenta varijacije od 23 za mjernu postaju Imotski te 23,1 za postaju Ričice. Obe vrijednosti koeficijenta varijacije ukazuju na umjerenu varijabilnost godišnjih količina oborina.

**Tablica 4.3** Minimalne, srednje i maksimalne mjesečne količine oborina, kao i koeficijenti varijacije (CV) srednjih mjesečnih oborina na postajama Imotski i Ričice u periodu od 1993-2021.

| mjesec   | minimalne |        | srednje |        | maksimalne |        | CV (%)  |        |
|----------|-----------|--------|---------|--------|------------|--------|---------|--------|
|          | Imotski   | Ričice | Imotski | Ričice | Imotski    | Ričice | Imotski | Ričice |
| Siječanj | 1,4       | 2,6    | 136,4   | 142,1  | 310,7      | 313,1  | 65,4    | 64,0   |
| Veljača  | 0,7       | 1,4    | 103,8   | 112,1  | 236,7      | 238,4  | 61,1    | 61,9   |
| Ožujak   | 0,0       | 0,1    | 99,8    | 105,9  | 259,1      | 276,1  | 72,3    | 71,8   |
| Travanj  | 21,6      | 6,3    | 98,9    | 103,6  | 202,3      | 223,0  | 42,8    | 50,1   |
| Svibanj  | 13,6      | 11,2   | 83,2    | 83,8   | 201,5      | 177,4  | 51,8    | 54,2   |
| Lipanj   | 7,9       | 4,3    | 62,2    | 64,1   | 256,1      | 178,2  | 87,3    | 68,2   |
| Srpanj   | 1,8       | 2,8    | 45,2    | 49,5   | 164,3      | 225,6  | 89,8    | 104,8  |
| Kolovoz  | 0,0       | 0,0    | 45,2    | 56,1   | 238,9      | 236,9  | 109,0   | 93,2   |
| Rujan    | 21,9      | 26,5   | 112,0   | 115,1  | 340,4      | 307,9  | 63,5    | 61,3   |
| Listopad | 12,6      | 7,5    | 120,7   | 122,3  | 281,2      | 298,7  | 64,1    | 56,2   |
| Studeni  | 47,0      | 54,1   | 186,2   | 214,2  | 361,2      | 470,1  | 49,4    | 56,5   |
| Prosinac | 0,0       | 0,0    | 172,7   | 192,4  | 444,9      | 450,2  | 62,3    | 61,3   |

#### *Prostorna distribucija oborina*

Prostorna distribucija prosječnih godišnjih količina oborina za razdoblje od 1993. do 2021. godine za šire područje Imotskog polja prikazana je na slici 4.5. Prostorna distribucija oborina napravljena je korištenjem interpolacijske metode inverzne udaljenosti temeljem podataka o prosječnim godišnjim količinama oborina u široj okolici Imotskog polja. Pri izradi karte prostorne distribucije oborina korišten je program QGIS, pritom koristeći interpolacijsku metodu inverzne udaljenosti s eksponentom udaljenosti 2. Osim postaja Imotski i Ričice, a u svrhu boljeg prikaza prostorne raspodjele oborina razmatrane su i udaljenije postaje Sinj, Split i Vrgorac, kao i postaje Livno i Mostar u Bosni i Hercegovini (slika 4.5). Iz prostornog prikaza vidljivo je da rubovi polja, sjeverozapadno prema Prološkom blatu i jugoistočno prema rijeci Matici, bilježe veću količinu oborina.



**Slika 4.5** Prostorna distribucija prosječnih godišnjih količina oborina na širem području Imotskog polja

Uz analizu prostorne varijabilnosti oborine, izračunati su i Pearsonovi koeficijenti determinacije za godišnje količine oborina između susjednih postaja u razdoblju od 1993. do 2021. godine (Slika 4.6).

Postaje Imotski i Ričice korištene su kao ciljne (*eng.* target) postaje, dok su ostale postaje služile kao referentne postaje. Usporedba koeficijenata determinacije prikazanih slici 4.6, čije su vrijednosti izračunate korištenjem softvera XLSTAT, ukazuje na visoke vrijednosti koeficijenata, odnosno na jaku povezanost rezultata, osobito na postajama koje se nalaze u neposrednoj blizini ciljnih postaja.



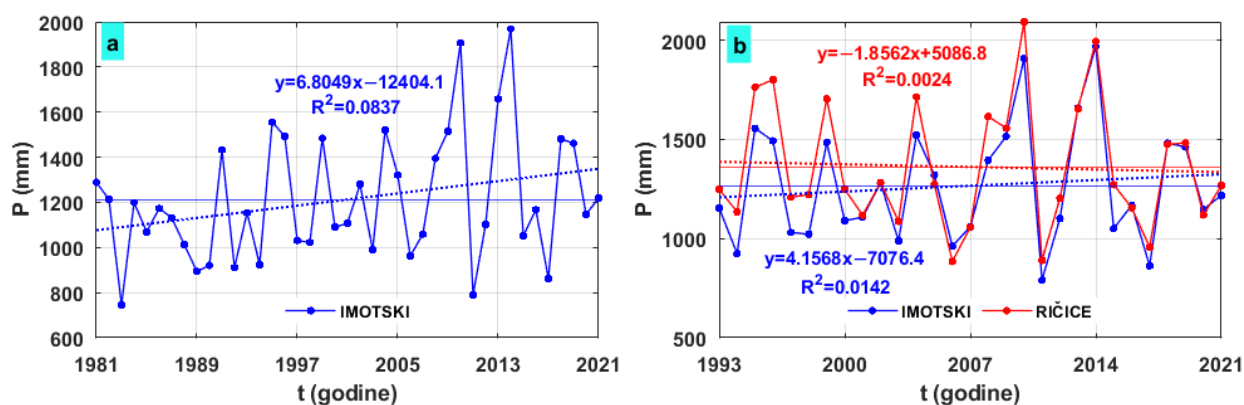
**Slika 4.6** Pregled Pearsonovih koeficijenata determinacije za godišnje količine oborina između susjednih postaja u razdoblju od 1993. do 2021. godine

#### Analiza oborina na godišnjoj razini

Analiza godišnjih količina oborina napravljena je na cijelom raspoloživom vremenskom nizu podataka na postaji Imotski, od 1981. godine do zaključno sa 2021. godinom, te u vremenskom periodu od 1993. do 2021. godine u kojem se raspoloživi vremenski nizovi na dvjema postajama preklapaju. U navedenom periodu prosječna godišnja količina oborina na postaji Imotski iznosila je 1212,5 mm. Na istoj postaji uočen je uzlazni trend kod godišnjih količina oborina (Slika 4.7a), a vrijednost magnitude trenda ( $\beta$ ) je 6,0575. Iako uzlazni trend postoji, M–K test (Tablica 4.4) je pokazao da trend nije statistički značajan ( $p > 0,05$ ). SNHT testom nije evidentirana promjena u srednjoj vrijednosti.

**Tablica 4.4** Magnituda trenda ( $\beta$ ) i rezultat M–K testa ( $p$ ) za seriju godišnjih količina oborina na postaji Imotski u periodu od 1981. do 2021. godine

|                  | magnituda trenda ( $\beta$ ) | M–K-Test ( $p$ ) |
|------------------|------------------------------|------------------|
| $P_{\text{god}}$ | 6,0575                       | 0,1474           |



**Slika 4.7** Godišnje količina oborina i trendovi na postaji Imotski od 1981. do 2021. godine (a) i usporedba godišnjih oborina i trendova na postajama Imotski i Ričice u razdoblju od 1993. do 2021. godine (b)

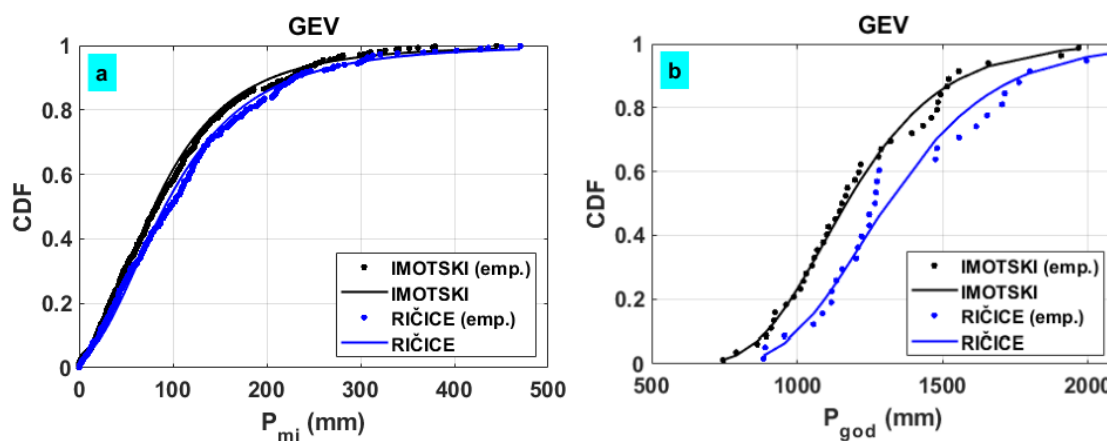
Usporedba godišnjih količina oborina na dvjema postajama ukazuje na različite oborinske trendove (Slika 4.7b). Na postaji Imotski postoji uzlazni trend godišnjih količina oborina, dok je na postaji Ričice trend silazan. Magnituda trenda ( $\beta$ ) izraženija je na postaji Imotski, ali prema rezultatima M–K testa ni jedan trend nije statistički značajan (Tablica 4.5). SNHT testom nije utvrđena promjena u srednjoj vrijednosti ni na jednoj postaji.

**Tablica 4.5** Magnitude trenda ( $\beta$ ) i rezultati M–K testa (p) za serije godišnjih količina oborina na postajama Imotski i Ričice u periodu od 1993. do 2021. godine

| meteorološka postaja | magnituda trenda ( $\beta$ ) |         | M–K-Test (p) |        |
|----------------------|------------------------------|---------|--------------|--------|
|                      | IM                           | RI      | IM           | RI     |
| $P_{\text{god}}$     | 4,7727                       | –2,7693 | 0,5865       | 0,6936 |

Uočeni negativni oborinski trend na postaji Ričice u skladu je s oborinskim trendovima uočenim u ostatku Hrvatske (Gajić-Čapka & Zaninović, 2006; Gajić-Čapka & Cindrić, 2011; Patarčić i ostali, 2014; Gajić-Čapka i ostali, 2015). Tako su negativni oborinski trendovi uočeni u većem dijelu Hrvatske, osim u istočnom kontinentalnom dijelu (Gajić-Čapka i ostali, 2015) te na nekim dalmatinskim otocima (Gajić-Čapka & Cindrić, 2011; Bonacci, 2019; Bonacci, Andrić, i ostali, 2021). Ovakav trend duž jadranske obale najviše je izražen na sjevernoj obali Jadrana (Crikvenica), a manje su uočava prema unutrašnjosti (Gajić-Čapka & Cindrić, 2011) i na srednjodalmatinskim otocima, gdje na nekima od njih nije zamijećen nikakav oborinski trend (Gajić-Čapka & Zaninović, 2006). S druge strane, pozitivan oborinski trend uočen na postaji Imotski može biti posljedica kontinentalnog utjecaja te utjecaja lokalnih faktora. Zbog značajne prostorne varijabilnosti oborina i različitih trendova uočenih na različitim postajama, uključujući

i one analizirane u drugim radovima, nije moguće donijeti jedinstveni zaključak o stvarnom trendu režima oborina. Međutim, oborinski režimi analizirani na četiri postaje (Split, Hvar, Lastovo i Zagreb) pokazuju blage tendencije prema intenziviranju oborinskih režima, što je povezano sa smanjenjem broja dana u godini s određenom količinom oborina i povećanjem intenzivnih oborina (Bonacci, Andrić, i ostali, 2021).



**Slika 4.8** Prikaz empirijske raspodjele (a) i kumulativne funkcije distribucije (b) maksimalnih mjesečnih i godišnjih oborina na postajama Imotski i Ričice prema GEV distribuciji

Vjerojatnost pojave ekstremnih maksimalnih vrijednosti izračunata je korištenjem generalizirane distribucije ekstremnih vrijednosti (GEV distribucija). Rezultati Kolmogorov-Smirnovog (KS) testa, prikazani u tablici 4.6, pokazuju da odabrana teoretska GEV distribucija dobro ( $p > 0,05$ ) opisuje empirijsku raspodjelu maksimalnih mjesečnih i godišnjih vrijednosti oborina na postajama Imotski i Ričice (Slika 4.8). Na temelju ovih rezultata, izračunati su odgovarajući povratni periodi za maksimalne vrijednosti oborina u razdoblju od 1981. do 2021. godine na postaji Imotski i od 1993. do 2021. godine na postaji Ričice (Tablica 4.7).

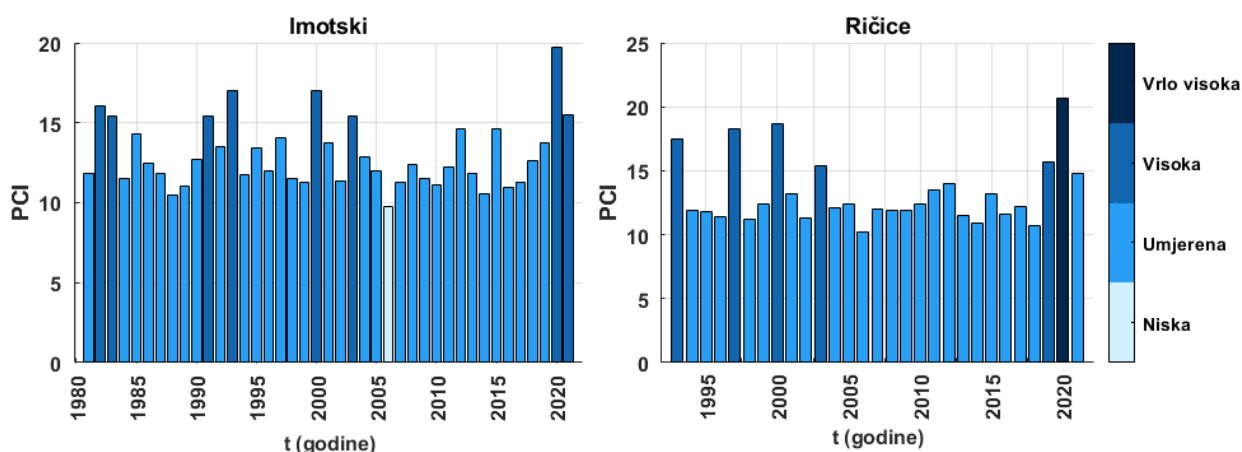
**Tablica 4.6** Rezultati KS testa za postaje Imotski i Ričice

| P        | KS test (p) |        |
|----------|-------------|--------|
|          | IMOTSKI     | RIČICE |
| mjesečne | 0,5229      | 0,4464 |
| godišnje | 0,9415      | 0,4055 |

**Tablica 4.7** Maksimalne godišnje i maksimalne mjesečne količine oborina te odgovarajući povratni periodi izračunati za postaje Imotski i Ričice

|          | IMOTSKI               |         | RIČICE                |         |
|----------|-----------------------|---------|-----------------------|---------|
|          | P <sub>max</sub> (mm) | T (god) | P <sub>max</sub> (mm) | T (god) |
| godišnji | 1968,7                | 63      | 2093                  | 36      |
| mjesečni | 444,9                 | 100     | 470,1                 | 84      |

S obzirom na vrijednosti indeksa koncentracije oborina (PCI) i uzimajući u obzir podjelu prema Oliver (1980), distribucija oborina na obje postaje je sezonska (Slika 4.9). Sezonska raspodjela oborina podrazumijeva varijacije u mjesečnim količinama oborina ovisno o godišnjem razdoblju. Tako se minimalna količina oborina javlja tijekom ljetnih mjeseci, dok se maksimalne količine oborina javljaju u hladnijem dijelu godine. Sve godine na obje postaje bilježe sezonsku raspodjelu oborina, osim 2006. godine na postaji Imotski kada je raspodjela oborina bila ujednačena tj. uniformna. Međutim visoka vrijednost PCI od 9,77 za istu godinu ipak ukazuje na raspodjelu oborina bliže sezonskoj.

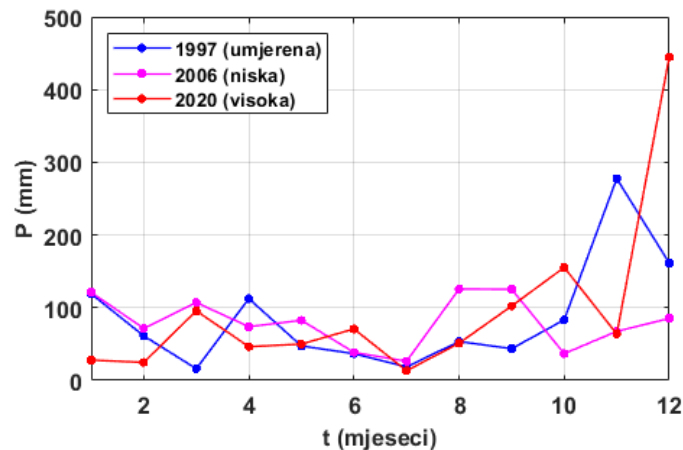
**Slika 4.9** Indeks koncentracije oborina (PCI) na godišnjoj razini na postajama Imotski i Ričice

Na obje postaje indeks koncentracije oborina je u 79% godina opisan kao umjeren, s umjerenom količinom oborine koja odstupa od prosjeka. Na postaji Imotski indeks koncentracije oborine visok je u 19% godina, a na postaji Ričice 17% godina. Vrlo visok indeks koncentracije oborina javlja se na postaji Ričice 2020. godine, dok je na postaji Imotski iste godine indeks umjeren, ali s iznimno visokom PCI vrijednošću od 19,75. Primjer kretanja niskog, umjerenog i visokog indeksa koncentracije oborine prikazan je na slici 4.10 na primjeru 2006. godine s ujednačenom raspodjelom oborine, 1997. godine s najvećom količinom oborina u studenom s



umjerenim odstupanjem od godišnjeg prosjeka i na primjeru 2020. godine s ekstremnom količinom oborina u prosincu koja znatno odstupa od godišnjeg prosjeka.

Trend vrijednosti PCI na postaji Imotski za razdoblje od 1981. do 2021. godine je silazni i nije statistički značajan ( $p>0,05$ ), dok je trend na postaji Ričice uzlazni i također nije statistički značajan ( $p>0,05$ ). Razmatrajući isto vremensko razdoblje na postaji Imotski kao i na postaji Ričice, uočava se također uzlazni trend vrijednosti PCI koji nije statistički značajan ( $p>0,05$ ).

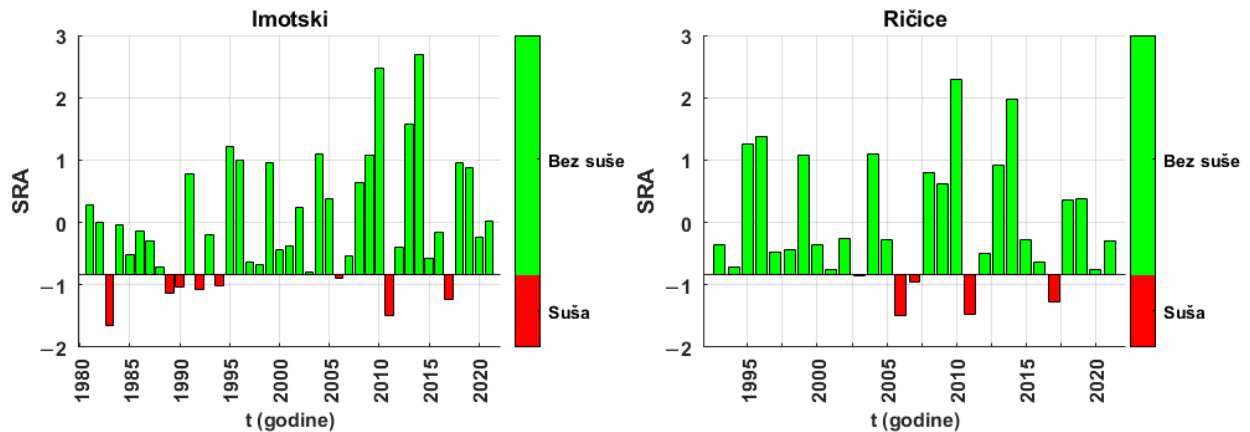


**Slika 4.10** Mjesečna količina oborina 1997., 2006. i 2020. godine na postaji Imotski za koje je sukladno vrijednostima PCI mjesečni indeks koncentracije oborina klasificiran kao umjeren, nizak i visok

Prisutnost i odsustvo sušnih razdoblja s obzirom na vrijednost standardizirane anomalije oborina (SRA) u periodu od 1981. do 2021. godine na postaji Imotski te od 1993. do 2021. godine na postaji Ričice prikazano je na slici 4.11. Na postaji Imotski nije evidentirano statističko značajno povećanje vrijednosti SRA gledajući cjelokupni dostupni niz podataka kao i razdoblje nakon 1993. godine. Navedeno ukazuje na manju pojavnost sušnih godina, ali i na smanjenje intenziteta suša. Tako je na postaji Imotski 20 % godina bilo sušno, uključujući jednu ekstremnu, jednu jaku i šest umjerenih godina. Od 1981. do 2020. zabilježeno je pet sušnih godina, a nakon toga samo tri. U tom se slučaju broj sušnih godina ne povećava, već se zapravo smanjuje. Međutim, uz izuzetak suše zabilježene 1983. godine, SRA vrijednosti pokazuju da je pojava sušnih godina rjeđa, ali intenzivnija. Na postaji Ričice 17% godina bilo je sušno (5 godina), od čega su dvije bile jako sušne, a tri umjereni sušne, bez zabilježene ekstremne suše. Za razliku od postaje Imotski, brojnost sušnih godina na postaji Ričice je posljednjih godina povećana, što pokazuje i trend opadanja vrijednosti SRA, koji još uvijek nije statistički značajan. Moguće je i da je intenzitet suše povećan na postaji Ričice kao i na postaji Imotski, ali se to ne može sa sigurnošću potvrditi zbog puno kraćeg vremenskog niza promatranja. Međutim sigurno je da na obje postaje raste intenzitet



pozitivnih SRA vrijednosti, odnosno prisutnost vlažnijih godina. Tako su najveće vrijednosti SRA na obje postaje izmjerene 2010. i 2014. godine, što se može pripisati velikoj količini oborine u tim godinama. Anomalije oborina upućuju na postojanje izraženijih ekstremnih pojava, bilo to izrazito kišnih godina povezanih s prekomjernom količinom oborina ili izrazito sušnih godina povezanih s manjkom oborina.

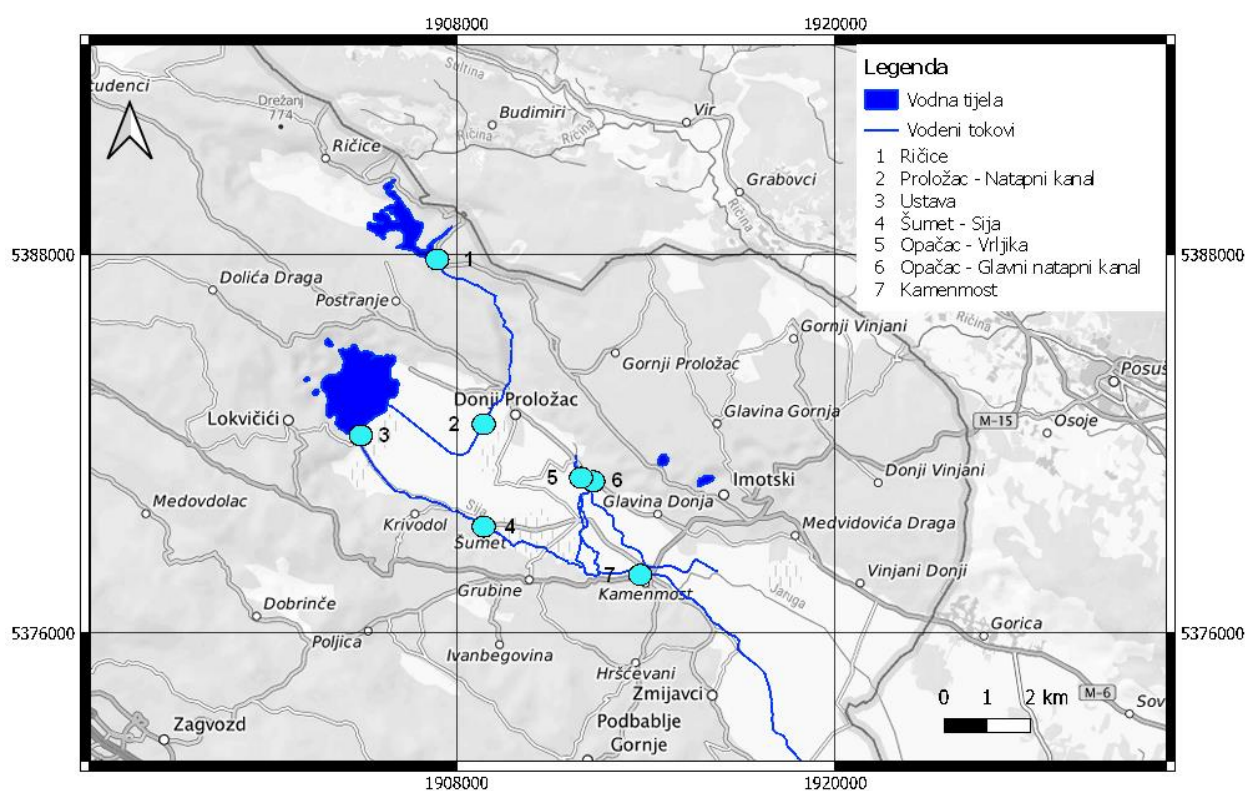


**Slika 4.11** Standardizirana anomalija oborina na postajama Imotski i Ričice

Utjecaj količine oborina očituje se i u hidrološkom funkcioniranju krških oblika. Tako je najintenzivnija suša nakon 1983. godine bila ona 2011. godine, kada je Modro jezero presušilo 88 dana. Modro jezero je znatno osjetljivije na količinu oborina nego Crveno jezero na čije hidrološko funkcioniranje dominantnu ulogu imaju regionalni protok i podzemne vode (Vrsalović i ostali, 2022). Kao rezultat toga, Modro jezero se isušilo tijekom gotovo svih zabilježenih sušnih razdoblja ( $SRA > 0,84$ ). S druge strane, poplave zabilježene 2010. i 2014. godine dovele su do izlivanja rijeke Vrljike iz korita i plavljenja poljoprivrednih površina. Koliko je poplavni val bio snažan 2010. godine dokazuje podatak da je razina vode u Modrom jezeru u 24 sata porasla za 5 m, a u akumulaciji Ričice u samo 4 sata slilo se čak 700.000 m<sup>3</sup> vode.

## 4.2. Hidrološka analiza

Hidrološka analiza uključuje analizu dostupnih podataka s hidroloških postaja Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ) na području Imotskog polja. Analizom je obuhvaćeno sedam mjernih postaja: Kamenmost, Opačac – Vrljika, Opačac – Glavni natapni kanal, Šumet – Sija, Ustava – Prološko blato, Ričice i Proložac – Natapni kanal (Slika 4.12). Navedene hidrološke postaje su limnigrafske, osim Kamenmosta i postaje Opačac – Vrljika koje su postaje sa automatskom dojavom podataka. Uz navedene postaje, DHMZ ima uspostavljenu i postaju Đogića Brana na vodotoku Vrljici koja neće biti predmet ove analize zbog malog niza raspoloživih podataka budući da je započela s radom tek 2021. godine.



**Slika 4.12** Karta hidroloških postaja DHMZ-a na širem području Imotskog polja (Osnovna karta: WMS TopPlusOpen)

Analiza obuhvaća analizu minimalnih, srednjih i maksimalnih godišnjih vrijednosti hidroloških parametara te detekciju trendova uz određivanje statističke značajnosti trendova. Parametri koji će se analizirati su vodostaj te protok, ovisno o dostupnosti mjerenih parametara na pojedinoj hidrološkoj postaji. Uz vodostaj te protok, na postaji Kamenmost analizirat će se i podaci o temperaturi vode s obzirom da je to jedina postaja od navedenih na kojoj se mjeri parametar temperature vode. Duljina raspoloživih vremenskih serija podataka je različita tako da je period razmatranja od početka mjerenja do zaključno sa 2021. godinom. U tablici 4.8 dan je pregled

hidroloških postaja s pripadajućim mjernim parametrima i duljinama raspoloživih nizova podataka.

Budući da su na slivu Imotskog polja provedeni zahvati koji su utjecali na distribuciju i fluktuacije količina voda, potrebno je s obzirom na položaj analizirane postaje odrediti postoji li utjecaj navedenih aktivnosti te ako postoji razlučiti razdoblja prije i poslije provedenih aktivnosti. Izvedeni zahvati uključuju regulaciju Sije i dijela Vrljike formiranjem zemljanog nasipa u Prološkom blatu 1956. godine, regulaciju Ričine i Suvaje izgradnjom akumulacije Ričice 1989. godine, te ostale zahvate u višim predjelima sliva, kao što je izgradnja akumulacije Rastovača 1956. godine i akumulacije Tribistovo 1990. godine (Ljubenković & Glavaš, 2017). Relevantno razdoblje za analizu varijabilnosti i trendova promatranih parametara je razdoblje nakon navedenih aktivnosti.

**Tablica 4.8** Pregled hidroloških postaja, mjerenih parametara te perioda dostupnosti podataka

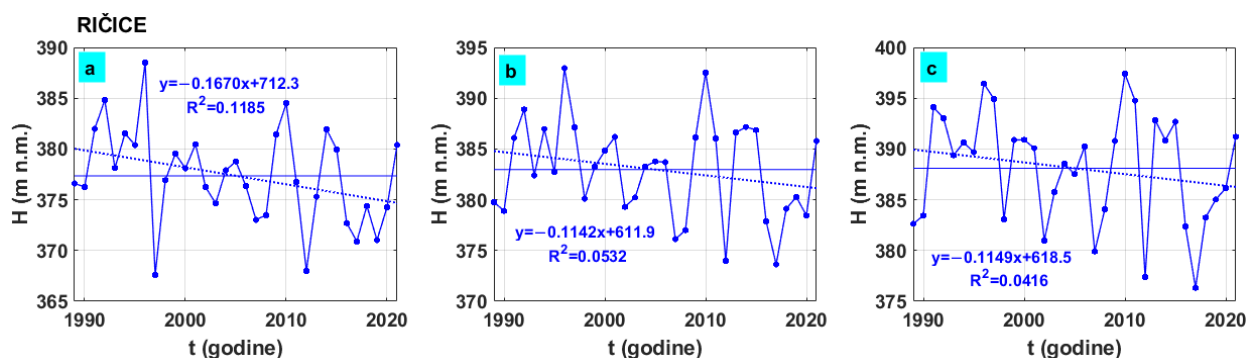
| Hidrološka postaja            | Parametri | Period dostupnosti podataka                 |
|-------------------------------|-----------|---|
| Ričice                        | H         | 1989-2021                                   |
| Proložac – Natapni kanal      | H, Q      | 2001-2021 (H i Q)                           |
| Ustava – Prološko Blato       | H         | 1966-2021                                   |
| Šumet - Sija                  | H, Q      | 1954-2021 (H); 1961-2021 (Q)                |
| Opačac – Vrljika              | H, Q      | 1994-2021 (H); 1995-2021 (Q)                |
| Opačac – Glavni natapni kanal | H, Q      | 1961-2021 (H); 1991-2021 (Q)                |
| Kamenmost                     | H, Q, T   | 1935-2021 (H); 1957-2021 (Q); 1955-2021 (T) |

#### 4.2.1. Analiza po mjernim postajama

##### *Hidrološka postaja Ričice*

Hidrološka postaja Ričice nalazi se na istoimenoj akumulaciji izgrađenoj 1989. godine. Analiza minimalnih, srednjih i maksimalnih godišnjih vodostaja ukazuje na trend sniženja vodostaja (Slika 4.13). S obzirom na vrijednost magnitude trenda ( $\beta$ ) od  $-0,1950$  najizraženiji pad je uočen kod minimalnih godišnjih vodostaja (Tablica 4.9). Rezultati M-K testa (Tablica 4.9) ukazuju da je trend smanjenja minimalnih godišnjih vodostaja statistički značajan ( $p < 0,05$ ), dok trendovi smanjenja srednjih i maksimalnih godišnjih vodostaja nisu statistički značajni ( $p > 0,05$ ). SNHT testom uočeno je da nema značajnih promjena u srednjoj vrijednosti što ukazuje na homogenost promatranih podataka.

Neizbježno je naglasiti da akumulacija Ričice koja je izgrađena s ciljem smanjenja plavljenja Imotskog polja i zadržavanja određenih količina voda u svrhu navodnjavanja u bezoborinskim razdobljima, ima velike gubitke vode kroz bokove i dno akumulacije (Bonacci & Roje-Bonacci, 2013). Gubici osim o razini podzemne vode variraju ovisno i o vodostaju, od 50 l/s pri niskim vodostajima do čak 800 l/s pri visokim vodostajima (Žugaj & Plantić, 1997). Analizom gubitaka u razdoblju od 1989. do 1995. godine uočen je linearan trend povećanja gubitaka (Žugaj & Plantić, 1997; Bonacci & Roje-Bonacci, 2013), tako da se opadajući trend uočen u ovom radu osim s klimatskim varijacijama koje uzrokuju pojavu intenzivnijih suša može povezati i sa problemom propusnosti same akumulacije Ričice.



**Slika 4.13** Prikaz kretanja (a) minimalnih, (b) srednjih i (c) maksimalnih vodostaja na hidrološkoj postaji Ričice

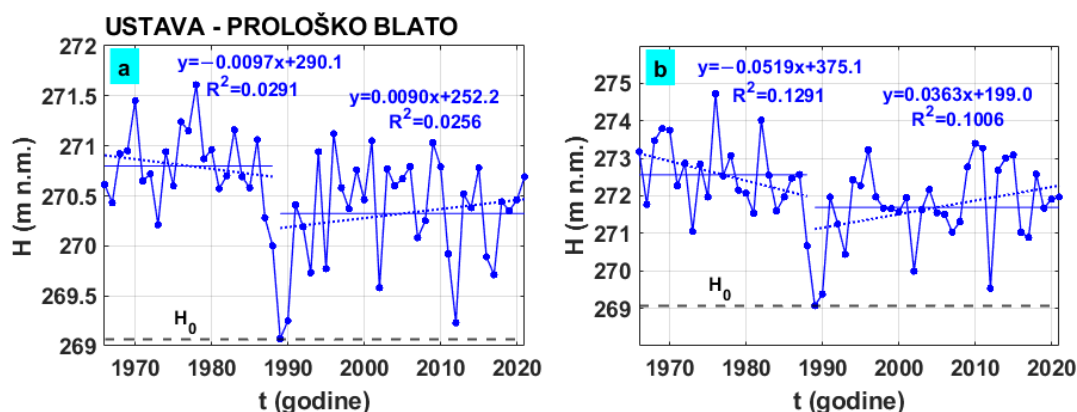
#### *Hidrološka postaja Proložac – Natapni kanal*

Hidrološka postaja Proložac – Natapni kanal smještena je na vodotoku Suvaje, čija je izdašnost toka izmijenjena 1989. godine izgradnjom akumulacije Ričice, iz koje se ispuštanja vrše povremeno sukladno potrebama. Mjeseci u kojima se bilježi ispuštanje su najčešće lipanj, srpanj i kolovoz kada su zbog sušnih razdoblja potrebe za navodnjavanjem najizraženije. Maksimalni zabilježeni vodostaj je 57 cm, a srednja godišnja vrijednost vodostaja je 22 cm. Najveći izmjereni protok je 1,2 m<sup>3</sup>/s, dok je prosjek tek 0,029 m<sup>3</sup>/s. Budući da su raspoloživi podaci s postaje Proložac – Natapni kanal prikupljeni nakon regulacije toka, a sam tok vode je rijetko aktivan, daljnja analiza ovog skupa podataka ne bi rezultirala značajnim spoznajama te stoga nije provedena.

## Hidrološka postaja Ustava – Prološko blato

Hidrološka postaja Ustava – Prološko blato smještena je na izlazu iz Prološkog blata, na početku toka Sije. Ustavom na nasipu provodi se regulacija otjecanja vode iz Prološkog blata prema Siji. Prološko blato zauzima površinu od 540 ha, od kojih je 40 ha prostora stalno pod vodom - područje Prološkog jezera. Površina Prološkog blata tako je znatno promjenjiva ovisno o podzemnim tokovima i razini podzemne vode, ali i u manjoj mjeri o površinskim tokovima s obzirom da je glavni površinski tok Suvaje od akumulacije Ričice reguliran.

Razine vode na ovoj postaji variraju, od minimalnog vodostaja koji se podudara s kotom nule od 269,071 m n.m., preko prosječnog godišnjeg vodostaja od 147 centimetara, do maksimalnog zabilježenog vodostaja od 566 centimetara. Budući da su gotovo svi godišnji vodostaji, osim onog iz 2010. godine, zabilježili vrijednosti koje odgovaraju potpuno suhom vodotoku, neće se provoditi daljnja analiza godišnjih minimalnih vodostaja. Analiza srednjih i maksimalnih godišnjih vodostaja bit će izvršena za razdoblje prije i nakon 1989. godine, imajući u vidu izvedeni zahvat izgradnje akumulacije Ričice uzvodno od analizirane postaje.



**Slika 4.14** Prikaz kretanja (a) srednjih i (b) maksimalnih godišnjih vodostaja na hidrološkoj postaji Ustava – Prološko blato;  $H_0$  = kota nule vodokaza od 269.071 m n.m.

Analiza podataka od 1966. do 2021. godine pokazuje silazni trend srednjih i maksimalnih godišnjih vodostaja do 1989. godine te uzlazni trend nakon 1989. godine (Slika 4.14). Od početka mjerenja do 2021. godine, jedina godina kada nije zabilježen vodostaj, odnosno kada je vodotok bio u potpunosti suh, bila je 1989. godina. Magnituda trenda ukazuje na nešto izraženiji uzlazni trend kod maksimalnih godišnjih ( $\beta=0,0252$ ) nego srednjih godišnjih ( $\beta=0,0048$ ) vodostaja. M-K testom utvrđeno je da uzlazni trendovi nisu statistički značajni ( $p>0,05$ ).

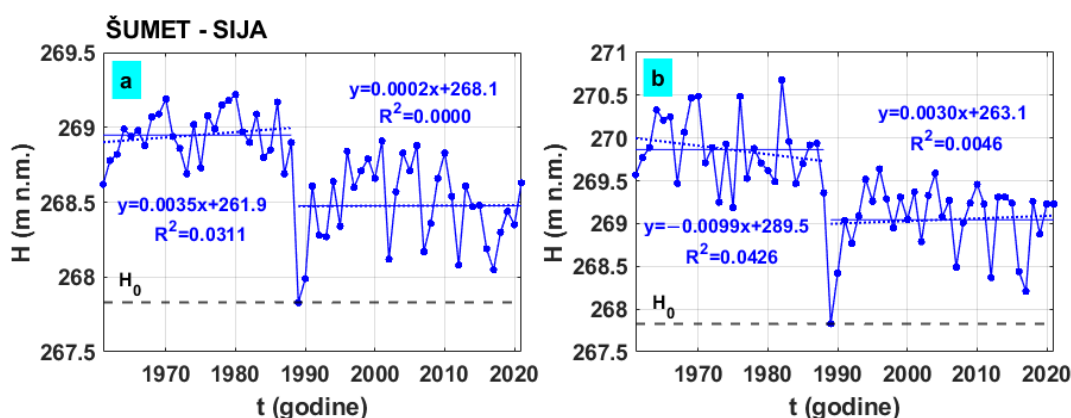
Rezultati SNHT testa provedenog na cjelokupnom setu podataka ukazuju na pomak u srednjoj vrijednosti kod srednjih godišnjih vodostaja nakon 1986. godine, a kod maksimalnih godišnjih vodostaja nakon 1983. godine. Iako se pomak u srednjoj vrijednosti uočava nešto ranije,

nagli pad vrijednosti evidentiran je u periodu od 1988. do 1990. godine, što koincidira s razdobljem izgradnje akumulacije Ričice. Ovim zahvatom u prostoru znatno je izmijenjena hidrološka slika nizvodnih područja, što se odražava i na ovoj hidrološkoj postaji. Rezultati T-testa potvrđuju statistički značajne promjene u srednjim i maksimalnim godišnjim vodostajima ( $p < 0,05$ ).

#### Hidrološka postaja Šumet – Sija

Hidrološka postaja Šumet - Sija smještena je na vodotoku Sije, a s radom je započela 01.01.1954. godine. Iako se vodostaji i protoci mjere od početka rada postaje, analiza je napravljena na nizu podataka od 1961. godine zbog toga što u razdoblju od 1954. do 1961. godine nedostaju mjerenja u trajanju od 5 godina. Kota nule vodokaza nalazi se na 267,829 m n.m. Prosječna godišnja vrijednost vodostaja je 86 cm, dok je maksimalni zabilježeni vodostaj iznosio 285 cm. Minimalni godišnji vodostaji bilježe razdoblja kad je vodotok u potpunosti suh tako da isti neće biti razmatrani. Kao i na prethodnoj postaji, provest će se analiza srednjih i maksimalnih godišnjih vodostaja te protoka za razdoblja prije i nakon 1989. godine, uzimajući u obzir izvedeni zahvat izgradnje akumulacije Ričice uzvodno od analizirane postaje.

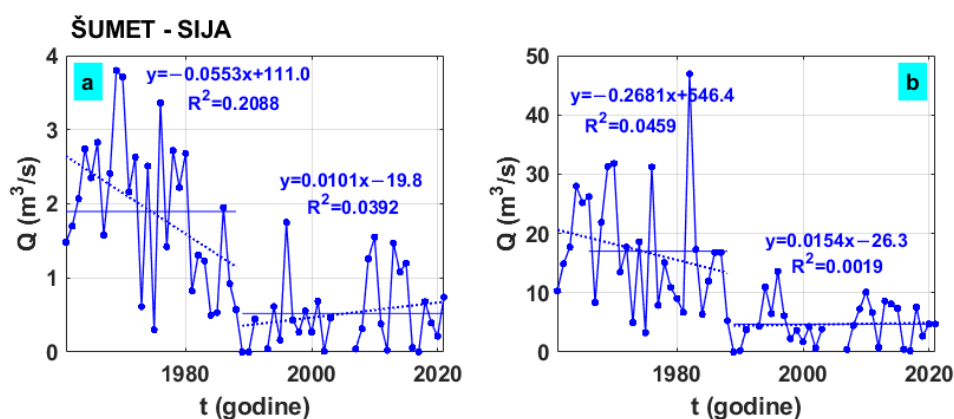
Do 1989. godine, srednji godišnji vodostaji bilježe uzlazni trend, dok maksimalni godišnji vodostaji do iste godine bilježe silazni trend (Slika 4.15). Nakon 1989. godine, i srednji i maksimalni godišnji vodostaji pokazuju blagi uzlazni trend. Vrijednosti magnitude trenda, posebno za maksimalne godišnje vodostaje ( $\beta=0$ ), sugeriraju da je trend zanemarivo rastući. Rezultati M-K testa ne pokazuju statističku značajnost trendova ( $p > 0,05$ ). SNHT testom uočen je pomak u srednjoj vrijednosti kod srednjih godišnjih vodostaja nakon 1988. godine, a kod maksimalnih godišnjih vodostaja nakon 1987. godine. T-testom je utvrđeno da su oba pomaka statistički značajna ( $p < 0,05$ ).



**Slika 4.15** Prikaz kretanja (a) srednjih i (b) maksimalnih godišnjih vodostaja na hidrološkoj postaji Šumet – Sija;  $H_0$  = kota nule vodokaza od 267.829 m n.m.



Analiza provedena na srednjim i maksimalnim godišnjim protocima ukazuje na silazni trend do 1989. godine te na uzlazni trend nakon 1989. godine (Slika 4.16). Vrijednosti magnitude trenda ukazuju na nešto izraženiji trend kod maksimalnih godišnjih ( $\beta=0,0256$ ) nego kod srednjih godišnjih protoka ( $\beta=0,0077$ ). Rezultati M-K testa ne pokazuju statističku značajnost trendova ( $p>0,05$ ). Pomak u srednjoj vrijednosti, utvrđen SNHT testom na cjelokupnom nizu podataka, primijećen je kod srednjih godišnjih protoka nakon 1980., dok se kod maksimalnih godišnjih bilježi nakon 1987. godine. T-testom utvrđeno je da su promjene u srednjoj vrijednosti statističke značajne ( $p<0,05$ ).

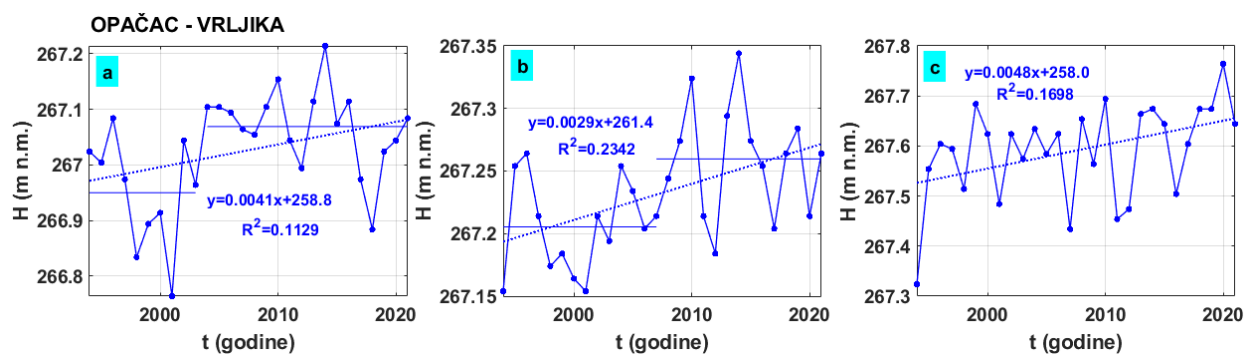


**Slika 4.16** Prikaz kretanja (a) srednjih i (b) maksimalnih godišnjih protoka na hidrološkoj postaji Šumet – Sija

Promjene u srednjim vrijednostima uočene kod srednjih i maksimalnih godišnjih vodostaja i protoka poklapaju se s razdobljem izgradnje akumulacije Ričice koja je imala značajan utjecaj na kretanje parametara i na ovoj postaji. Iznimka je pomak uočena 1980. godine kod srednjih godišnjih protoka, ali isto tako je primjetno i opadanje vrijednosti srednjih godišnjih protoka u razdoblju izgradnje akumulacije.

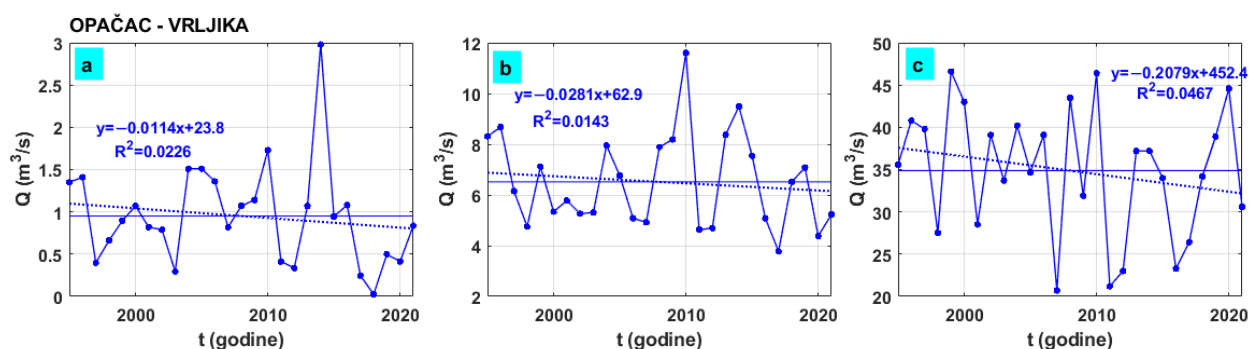
#### *Hidrološka postaja Opačac - Vrljika*

Hidrološka postaja Opačac – Vrljika smještena je u blizini istoimenog izvora koje se nalazi uz desnu stranu Vrljike, udaljeno oko 60 m od ruba polja (Bojanić i ostali, 1981). Od svog osnutka 1994. godine, postaja bilježi parametre vodostaja, a godinu kasnije i protoka (Tablica 4.8). Najviši zabilježeni vodostaj iznosio je 156 cm, dok je najniži iznosio 56 cm, uz prosječnu vrijednost od 103 centimetra. Što se tiče protoka, najveći zabilježeni iznosio je 104 m<sup>3</sup>/s, dok je najniži iznosio 0,08 m<sup>3</sup>/s, uz prosječnu vrijednost od 9,85 m<sup>3</sup>/s.



**Slika 4.17** Prikaz kretanja (a) minimalnih, (b) srednjih i (c) maksimalnih godišnjih vodostaja na hidrološkoj postaji Opačac – Vrljika

Trendovi minimalnih, srednjih i maksimalnih godišnjih vodostaja na postaji Opačac – Vrljika imaju uzlaznu putanju (Slika 4.17). Usporedbom vrijednosti magnitude trenda ( $\beta$ ) uočljivo je da je uzlazni trend najizraženiji kod maksimalnih godišnjih vodostaja (Tablica 4.9). Pomak u srednjoj vrijednosti, utvrđen SNHT testom, primijećen je kod minimalnih godišnjih vodostaja nakon 2003., dok se kod srednjih godišnjih bilježi nakon 2007. godine. Rezultati T-testa potvrđuju statistički značajne promjene u minimalnim i srednjim godišnjim vodostajima ( $p < 0,05$ ). M-K testom utvrđeno je da su uzlazni trendovi kod srednjih i maksimalnih godišnjih vodostaja statistički značajni ( $p > 0,05$ ).



**Slika 4.18** Prikaz kretanja (a) minimalnih, (b) srednjih i (c) maksimalnih godišnjih protoka na hidrološkoj postaji Opačac – Vrljika

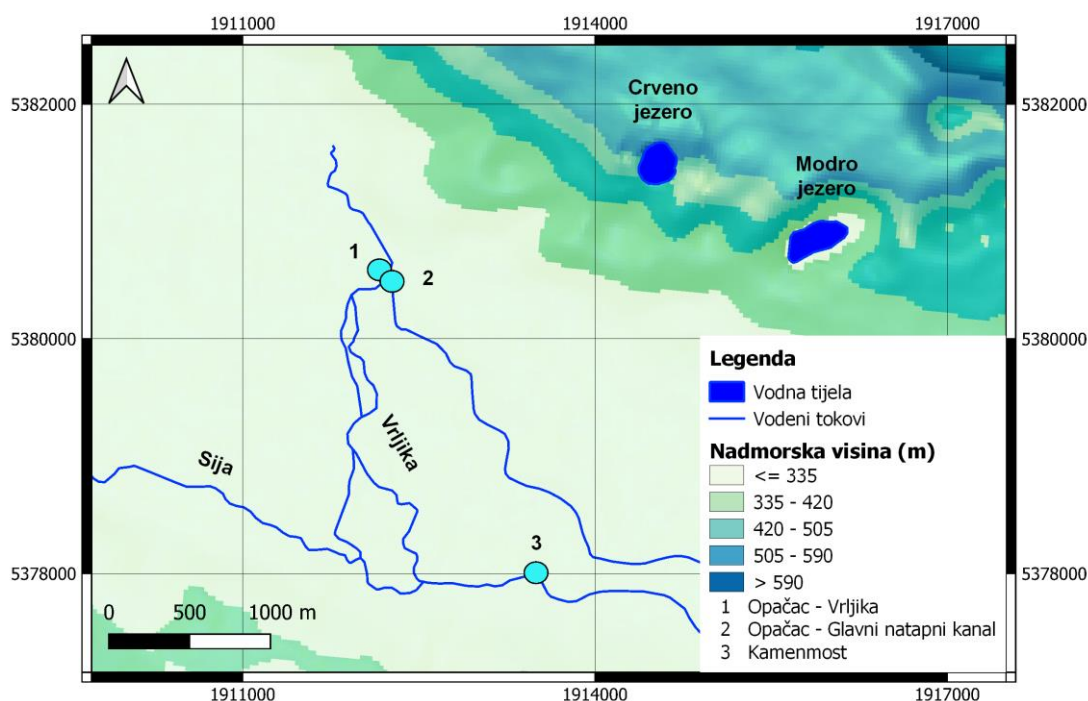
Minimalni, srednji i maksimalni godišnji protoci pokazuju silaznu putanju (Slika 4.18). Minimalni godišnji protoci najsporije opadaju ( $\beta = -0,0178$ ), dok maksimalni godišnji protoci pokazuju najizraženiji trend smanjenja protoka ( $\beta = -0,18$ ). Iako su i kod minimalnih, srednjih i maksimalnih godišnjih protoka evidentirani trendovi smanjenja protoka, M–K testom utvrđeno je da nisu statistički značajni ( $p > 0,05$ ). SNHT testom nisu utvrđene promjene u srednjim vrijednostima.



Analizom karakterističnih godišnjih vrijednosti vodostaja i protoka na mjernoj postaji Opačac – Vrljika utvrđene su razlike u evidentiranim trendovima. Tako vodostaji pokazuju uzlazan trend, dok protoci silazan trend. Isto se može objasniti stvaranjem nanosa u koritu, što rezultira nešto višim vrijednostima vodostaja. Osim toga, činjenica da od regulacije Vrljike šezdesetih godina nije provedena cjelovita rekonstrukcija sustava i čišćenje korita (Erdelez i ostali, 2020) dodatno podupire ovu pretpostavku. Također objašnjava i pojavu da SNHT ukazuje na homogenost podataka o protocima, dok se kod podataka o vodostajima bilježe promjene u srednjim vrijednostima.

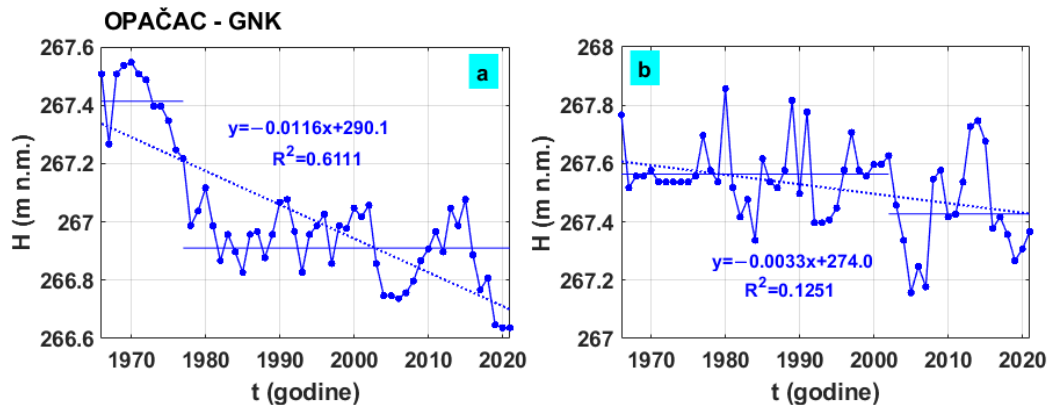
#### *Hidrološka postaja Opačac – Glavni natapni kanal*

Hidrološka postaja Opačac – Glavni natapni kanal nalazi se u blizini hidrološke postaje Opačac – Vrljika, udaljene otprilike 30 metara jedna od druge. Glavni natapni kanal od iznimne je važnosti jer se koristi za navodnjavanje jugoistočnog dijela Imotskog polja. Zbog postojanja ovog kanala, ali i ostalih dodatnih kanala za navodnjavanje, mjerne postaje Opačac i Kamenmost, iako se nalaze na svega 2,5 km zračne udaljenosti (Slika 4.19), ne mjere jednak protok (Željковиć, 2015).

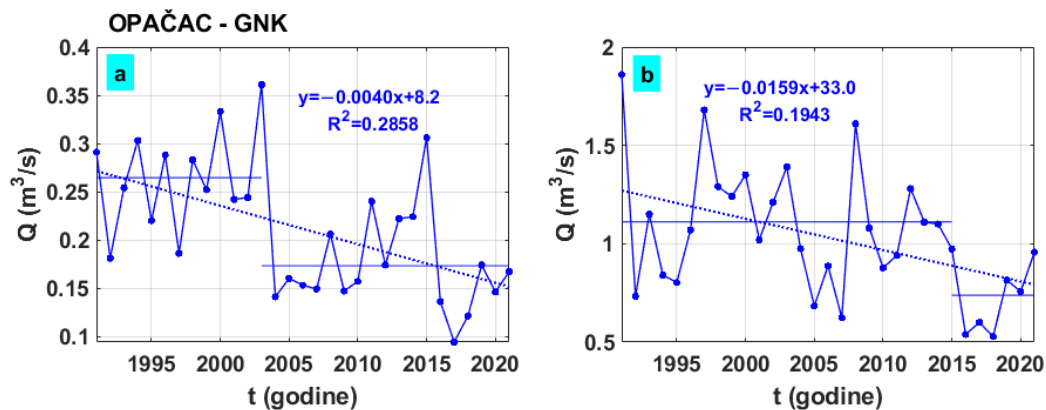


**Slika 4.19** Karta s postajama Opačac – Vrljika, Opačac – Glavni natapni kanal i Kamenmost

Analizom vodostaja i protoka utvrđeni su silazni trendovi kod srednjih i maksimalnih vrijednosti vodostaja (Slika 4.20) i protoka (Slika 4.21) koji su statistički značajni ( $p > 0,05$ ). Iako su podaci s ove mjerne postaje korišteni za modeliranje hidrodinamike krškog vodonosnika šireg područja Imotskog polja, hidrološka analiza ekstrema i trendova vodostaja i protoka nije relevantna zbog kontroliranog ispuštanja vode na postaji.



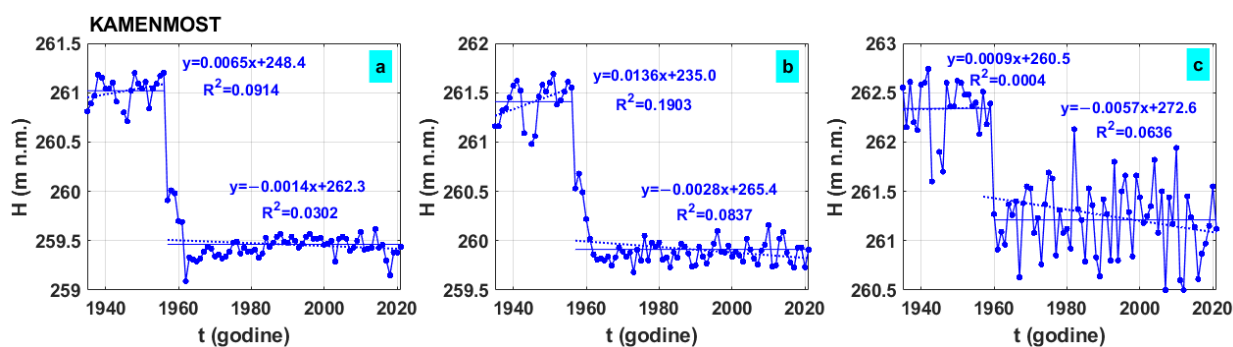
Slika 4.20 Prikaz kretanja (a) srednjih i (b) maksimalnih godišnjih vodostaja na hidrološkoj postaji Opačac – Glavni natapni kanal



Slika 4.21 Prikaz kretanja (a) srednjih i (b) maksimalnih godišnjih protoka na hidrološkoj postaji Opačac – Glavni natapni kanal

## Hidrološka postaja Kamenmost

Hidrološka postaja Kamenmost druga je najnižvodnija postaja DHMZ-a na rijeci Vrljici nakon Đogića Brane uspostavljene 2021. godine. Iako prvi raspoloživi podaci datiraju iz 1935. godine, postaja je s radom započela 1887. godine. Na ovoj mjernoj postaji prate se parametri vodostaja, protoka i temperature vode. Promjena kote nule vodokaza izvršena je 1957. godine pri čemu je visina promijenjena sa 260,996 m n.m. na 259,694 m n.m.. Tako su vodostaji prikazani na slici 4.22 dobiveni dodavanjem odgovarajuće visinske kote na očitane vrijednosti vodostaja.

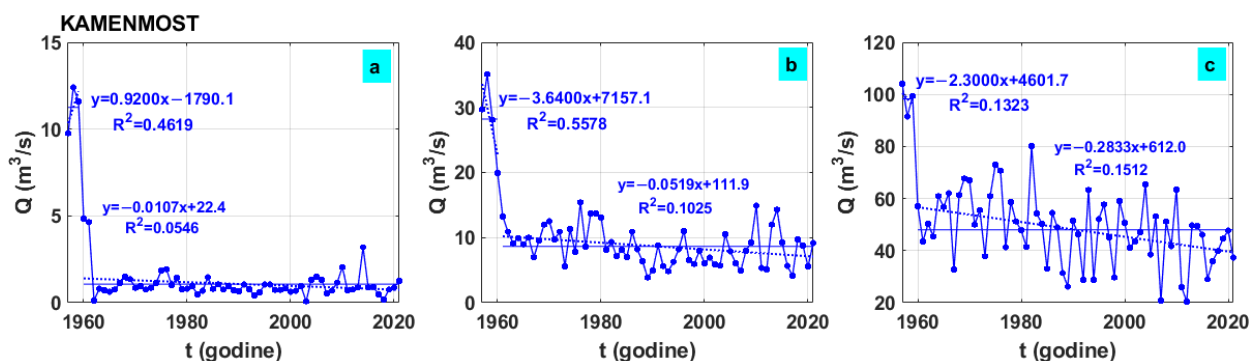


**Slika 4.22** Prikaz kretanja (a) minimalnih, (b) srednjih i (c) maksimalnih godišnjih vodostaja na hidrološkoj postaji Kamenmost

Minimalni, srednji i maksimalni godišnji vodostaji bilježe izrazitu promjenu u srednjoj vrijednosti u razdoblju od 1957. do 1960. godine. Isto potvrđuju i rezultati SNHT testa koji ukazuje na promjenu srednje vrijednosti kod minimalnih i srednjih godišnjih vodostaja nakon 1956. godine, a kod maksimalnih godišnjih vodostaja nakon 1959. godine. T-testom utvrđeno je da su oba pomaka statistički značajna ( $p < 0,05$ ).

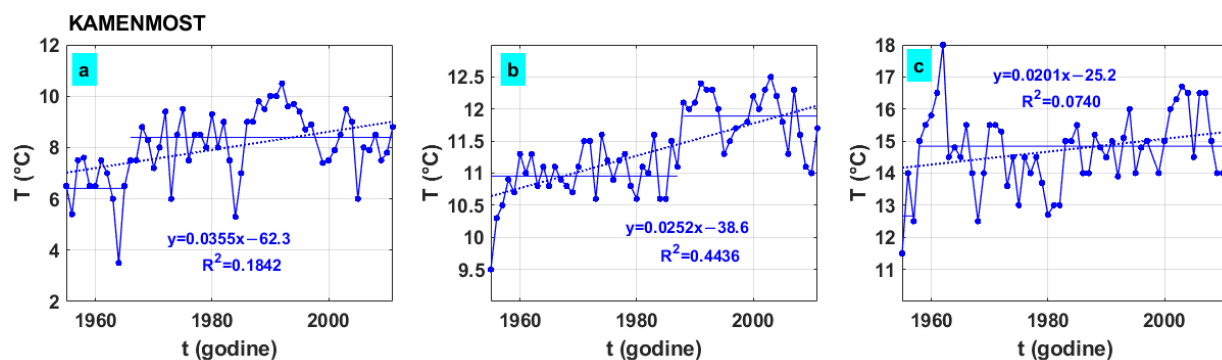
Osim promjene kote nule vodokaza, u navedenom periodu izvršeni su različiti zahvati regulacije Vrljike, prije svega formiranje zemljanog nasipa u Prološkom blatu 1956. godine, ali i zahvati u uzvodnijem dijelu sliva Imotskog polja poput izgradnje akumulacije Rastovača na Topali 1956. godine (Ljubenković & Glavaš, 2017) koje su očigledno imale znatnog utjecaja na fluktuacije vodostaja na postaji Kamenmost.

Svi grafovi na ovoj postaji pokazuju trend rasta vodostaja do šezdesetih godina, nakon čega trendovi postaju silazni. Najizraženiji silazni trend uočen je kod maksimalnih godišnjih vodostaja ( $\beta = -0,0039$ ). Iako su i kod minimalnih, srednjih i maksimalnih godišnjih vodostaja evidentirani silazni trendovi, M–K testom utvrđeno je da nisu statistički značajni ( $p > 0,05$ ).



**Slika 4.23** Prikaz kretanja (a) minimalnih, (b) srednjih i (c) maksimalnih godišnjih protoka na hidrološkoj postaji Kamenmost

Slično kao i vodostaji, protoci također bilježe izrazitu promjenu srednje vrijednosti u šezdesetima (Slika 4.23). Rezultati SNHT testa pokazuju na promjenu srednje vrijednosti kod minimalnih i maksimalnih godišnjih protoka nakon 1959. godine, a kod srednjih godišnjih nakon 1960. godine. T-testom utvrđeno je da su pomaci statistički značajni ( $p < 0,05$ ). Prethodno također možemo pripisati antropogenim aktivnostima u slivu Imotskog-bekijskog polja koje su imali velikog utjecaja na hidrološku sliku ovog područja. Trendovi nakon 1959. godine, odnosno 1960. u slučaju srednjih godišnjih protoka, bilježe negativan trend. Najizraženiji trend bilježe maksimalni godišnji protoci ( $\beta = -0,2876$ ). M–K testom utvrđeno je da negativan trend kod minimalnih godišnjih protoka nije statistički značajan ( $p > 0,05$ ), dok su trendovi kod srednjih i maksimalnih godišnjih protoka statistički značajni ( $p < 0,05$ ).



**Slika 4.24** Prikaz kretanja (a) minimalnih, (b) srednjih i (c) maksimalnih godišnjih temperatura vode na hidrološkoj postaji Kamenmost

Prosječna godišnja temperatura vode izmjerena na postaji Kamenmost iznosi 11.3 °C. Najniža temperatura vode od 3.5 °C izmjerena je 31.01.1964., dok je maksimalna temperatura vode od 18 °C izmjerena 19.8.1962. Minimalne, srednje i maksimalne godišnje temperature vode mjerene u razdoblju od 1955. do 2011. godine pokazuju trend rasta (Slika 4.24). Najizraženiji trend rasta primjećuje se kod minimalnih godišnjih temperatura vode ( $\beta = 0,0351$ ).

SNHT testom uočene su promjene u srednjim vrijednostima kod minimalnih godišnjih temperatura vode nakon 1965. godine, kod srednjih godišnjih temperatura vode nakon 1987. godine te kod maksimalnih godišnjih temperatura vode nakon 1957. godine. M–K testom utvrđeno je da su trendovi porasta minimalnih i srednjih godišnjih temperatura vode statistički značajni ( $p < 0,05$ ), dok maksimalnih godišnjih temperatura voda nisu statistički značajni ( $p > 0,05$ ).

Zaključno, najizraženije promjene ( $\beta = -0,2867$ ) evidentirane su na postaji Kamenmost uz statistički značajno ( $p = 4,70 \times 10^{-5}$ ) smanjenje maksimalnih vrijednosti protoka, a potom na postaji Ričice s magnitudom trenda od  $-0,1950$  uz statistički značajno ( $p = 0,0338$ ) smanjenje minimalnih vrijednosti vodostaja (Tablica 4.9).

**Tablica 4.9** Minimalni, srednji i maksimalni protoci zabilježeni na hidrološkim postajama Kamenmost, Opačac – Vrljika, Opačac – Glavni natapni kanal i Šumet – Sija u odgovarajućim vremenskim periodima

|          | postaja                     | magnituda trenda ( $\beta$ ) |                        |           | M–K-test ( $p$ ) |                         |                         |
|----------|-----------------------------|------------------------------|------------------------|-----------|------------------|-------------------------|-------------------------|
|          |                             | min                          | sred                   | max       | min              | sred                    | max                     |
|          | Ričice                      | $-0,1950$                    | $-0,0747$              | $-0,1113$ | $0,0338^*$       | $0,3771$                | $0,4294$                |
|          | Proložac – NK               | –                            | –                      | –         | –                | –                       | –                       |
|          | Ustava<br>(1989-2021)       | –                            | $0,0048$               | $0,0252$  | –                | $0,6091$                | $0,2646$                |
| <b>H</b> | Šumet – Sija<br>(1989-2021) | –                            | $-0,0017$              | $0$       | –                | $0,7922$                | $0,9629$                |
|          | Opačac –<br>Vrljika         | $0,003$                      | $0,0032$               | $0,0039$  | $0,1186$         | $0,0108^*$              | $0,0231^*$              |
|          | Opačac – GNK                | –                            | $-0,0111$              | $-0,0031$ | –                | $1,71 \times 10^{-6}^*$ | $0,0039^*$              |
|          | Kamenmost                   | $-7,45 \times 10^{-4}$       | $-7,14 \times 10^{-4}$ | $-0,0039$ | $0,5995$         | $0,5012$                | $0,1370$                |
|          | Šumet – Sija<br>(1989-2021) | –                            | $0,0077$               | $0,0256$  | –                | $0,2448$                | $0,4760$                |
| <b>Q</b> | Opačac –<br>Vrljika         | $-0,0178$                    | $-0,0433$              | $-0,18$   | $0,1745$         | $0,1144$                | $0,2973$                |
|          | Opačac – GNK                | –                            | $-0,0039$              | $-0,18$   | –                | $0,0010^*$              | $0,0390^*$              |
|          | Kamenmost                   | $-0,003$                     | $-0,0627$              | $-0,2867$ | $0,3050$         | $0,004^*$               | $4,70 \times 10^{-5}^*$ |
| <b>T</b> | Kamenmost                   | $0,0351$                     | $0,0250$               | $0,02$    | $0,002^*$        | $6,05 \times 10^{-7}^*$ | $0,0641$                |

\*statistički značajan trend

### 4.3. Identifikacija hidroloških procesa u krškom vodonosniku

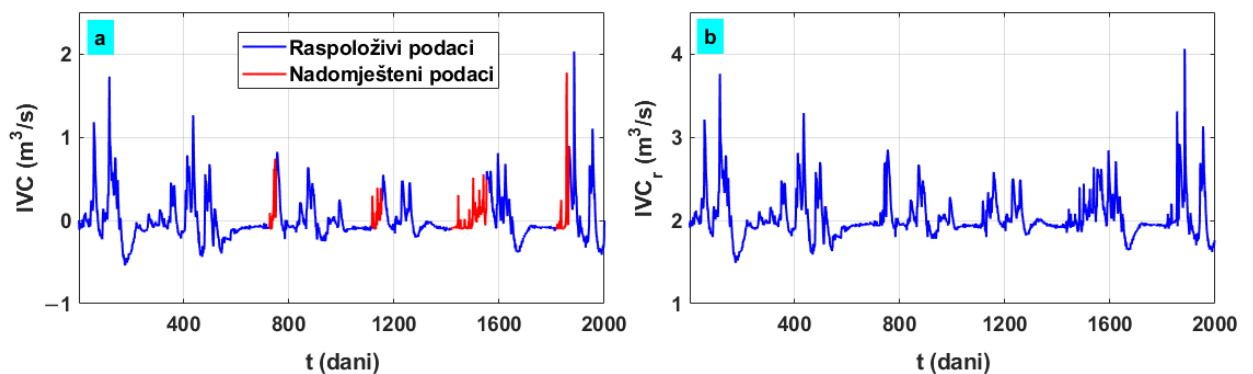
Identifikacija hidroloških procesa u krškom vodonosniku uključuje analizu dostupnih podataka u Crvenom jezeru, čija izravna povezanost s krškim vodonosnikom (Bonacci & Roje-Bonacci, 2000a) omogućuje detaljan uvid u dinamiku vode unutar tog specifičnog hidrološkog sustava. Uz podatke o razinama vode u Crvenom jezeru prikupljenim pri znanstvenom projektu “Risk identification and land-use planning for disaster mitigation of landslides and floods in Croatia” (Bonacci & Andrić, 2014; Andrić i ostali, 2017, 2018), korišteni su i podaci Državnog hidrometeorološkog zavoda o količini oborina na mjernoj postaji Imotski kao i podaci o protocima na izvoru Opačac. Razdoblje razmatranja je od 28. rujna 2013. do 20. ožujka 2019. godine.

Hidrološki režim Crvenog jezera praćen je analizom kvazirecesijskih krivulja i odgovarajuće anvelope krivulja. Općenito, primjena recesijske analize omogućuje određivanje karakteristika vodonosnika, akumulacijskih svojstava, te utjecaja različitih čimbenika na proces otjecanja (Tallaksen, 1995). Nadalje, omogućuje distinkciju između sporog otjecanja kroz kršku matricu i brzog otjecanja kroz krške provodnike (Basha, 2020). Uz recesijsku analizu, spektralna analiza ili analiza u frekvencijskoj domeni korištena je za promatranje periodičnosti signala, međuovisnosti i vremenskog kašnjenja između signala.

S obzirom na tehnička ograničenja u mjerenju vodostaja, serija dostupnih podataka u Crvenom jezeru nije potpuna, što je rezultiralo nedostajućim podacima koji su nadomješteni korištenjem neuronskih mreža. Ulazni podaci za predviđanje vrijednosti integralnih promjena volumena su: temperatura zraka, relativna vlažnost zraka i količina oborina izmjerena na meteorološkoj postaji Imotski. S obzirom da je odabrani dinamički nelinearni model višeslojna mreža, on osim sloja s ulaznim i izlaznim vrijednostima sadrži i skrivene slojeve neurona. Odabrani broj skrivenih slojeva je 10. Budući da većina fizičkih i bioloških procesa uključuje kašnjenja, vremensko kašnjenje je također uključeno u izračun (Ojha i ostali, 2010).

Treniranje neuronske mreže izvršeno je za period od 28. rujna 2013. do 25. rujna 2015. godine. Validacija je izvršena za period od 26. rujna 2015. godine do 17. listopada 2016. godine, a testiranje na podacima od 18. listopada 2016. do 20. ožujka 2019. godine. Simuliran je cijeli promatrani niz podataka i nedostajući podaci su nadomješteni rezultatima neuronske mreže koji najbolje simuliraju mjerene podatke na poznatim intervalima. Treniranje podataka provedeno je korištenjem Bayesove regularizacije, matematičke metode za rješavanje problema u domenama gdje postoje ograničeni podaci. Metoda se temelji na Bayesovom teoremu uvjetne vjerojatnosti (Burden & Winkler, 2008). Svi ovi koraci izvedeni su pomoću programskog paketa MATLAB

(verzija R2021a (9.10)). Rezultati primjene neuronske mreže na integralnu promjenu volumena jezera prikazani su na slici 4.25.

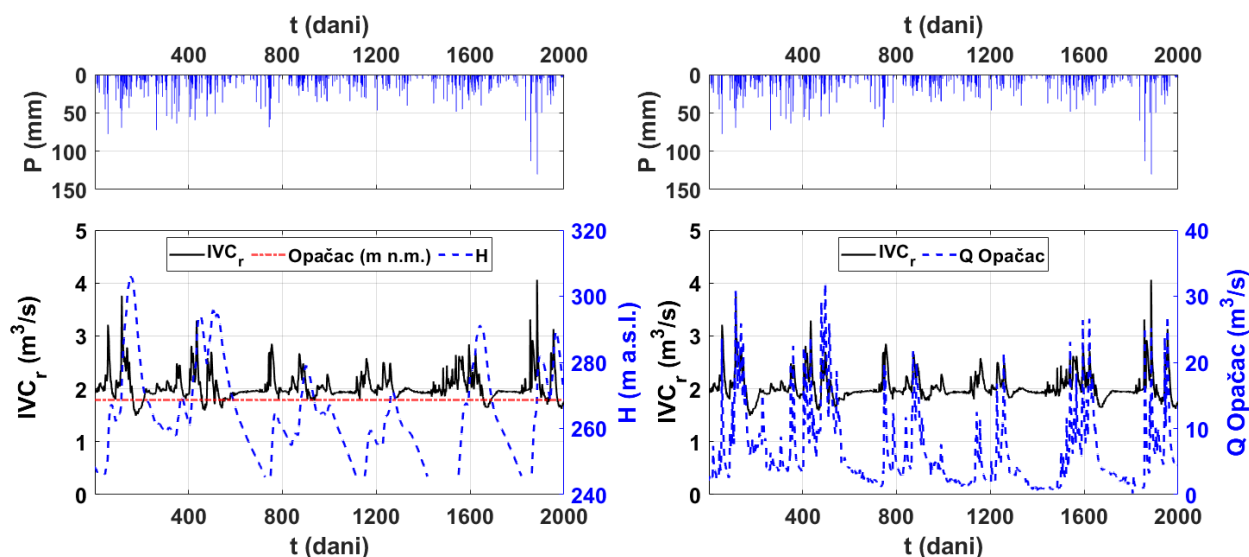


**Slika 4.25** Integralne promjene volumena Crvenog jezera s imputiranim nedostajućim vrijednostima (a) i transformirane vrijednosti integralnih promjena volumena  $IVC_r$  (b)

#### 4.3.1. Analiza dinamike Crvenog jezera i perioda recesije

Na slici 4.26 prikazani su podaci o vodostaju u jezeru, zabilježene količine oborina na meteorološkoj postaji Imotski, te transformirane vrijednosti integralnih promjena volumena ( $IVC_r$ ) u jezeru. Također, izvršena je i usporedba integralnih promjena volumena u Crvenom jezeru sa protocima na izvoru Opačac. Pojava vršnih vrijednosti u integralnim promjenama volumena uspoređena je s količinom oborina. Utvrđeno je da na promjene integralnog volumena veći utjecaj ima trajanje oborina nego njihov intenzitet. Primjerice, oborina od 72,5 mm 264. dana promatranja nije rezultirala značajnom promjenom ni u integralnom volumenu ni u razini vode u jezeru. S druge strane, oborine od 110. do 160. dana, gdje je najdulje razdoblje bez oborina bilo samo četiri dana, uzrokovale drugu najveću vršnu vrijednost u integralnim promjenama volumena. Može se zaključiti da podzemne rezerve, koje ovise o veličini i broju krških provodnika, pora i pukotina, imaju značajan utjecaj na varijacije integralnih promjena volumena.





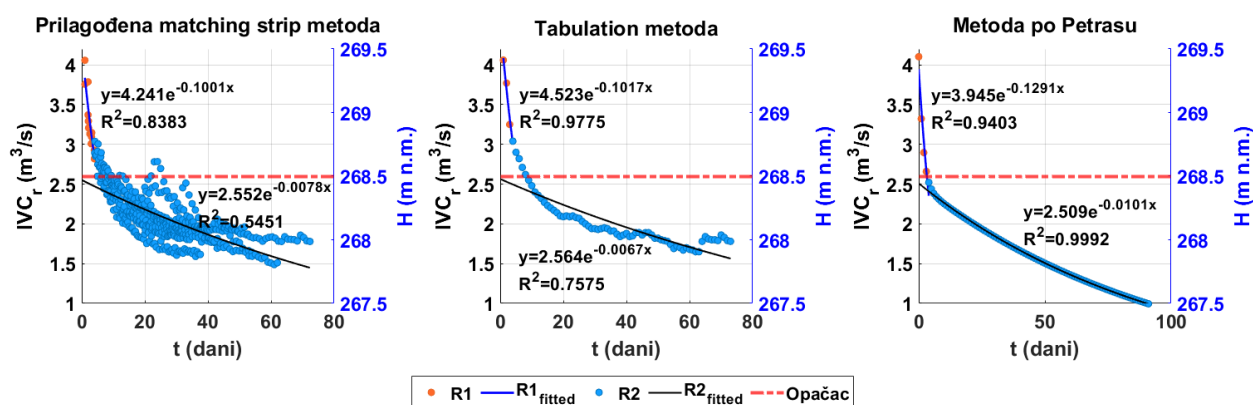
**Slika 4.26** Usporedba oborina na mjernoj postaji Imotski s integralnim promjenama volumena u Crvenom jezeru ( $IVCr$ ), razinama vode u jezeru ( $H$ ), naznačenom nadmorskom visinom izvora Opačac te s protocima na izvoru Opačac ( $Q$  Opačac)

Razina vode u Crvenom jezeru oscilira kao odgovor na vremensku raspodjelu oborina (Slika 4.26). Zamjetan je pomak u nagibu vodostaja ( $H$ ) na razini od 268,5 m n.m., što odgovara nadmorskoj visini izvora Opačac. Ispod ove razine, diskontinuitet ukazuje na sporije opadanje razine vode, odražavajući postupno pražnjenje vodnih zaliha. Nasuprot tome, iznad te razine bilježi se daleko veći broj izraženijih vršnih vrijednosti. Tako vodostaji iznad kritične razine od 268,5 m n.m. uzrokuju brže pražnjenje jezera. Ovaj fenomen mogao bi se objasniti postojanjem krškog provodnika koji povezuje Crveno jezero i izvor Opačac. Iz tog razloga napravljena je usporedba integralnih promjena volumena s protocima na Opačcu prikaza na slici 4.26. Evidentna je podudarnost vršnih vrijednosti i recesijskih razdoblja, dok punjenje Crvenog jezera koincidira s povećanjem protoka na Opačcu. Kako bi se bolje objasnila interakcija između ova dva sustava, u nastavku su dani rezultati recesijske i spektralne analize.

Analizom kvazirecesijskih krivulja dobivenih korištenjem tri različite metode opisane u prethodnom poglavlju, stvorena je kompozitna kvazirecesijska krivulja (glavna kvazirecesijska krivulja) s prosječnim vrijednostima kvazirecesijskih koeficijenata (Slika 4.25). Kompozitna kvazirecesijska krivulja može se podijeliti na dva dijela: strmiji dio koji reflektira direktno otjecanje vode te dio blažeg nagiba koji predstavlja sporo bazno otjecanje. Na isti način se razlikuju i kvazirecesijski koeficijenti:  $\alpha_1$  predstavlja brzo pražnjenje kanala i pukotina u kršu i ujedno opisuje i propusniji vodonosnik, dok  $\alpha_2$  predstavlja sporije pražnjenje podzemnih rezervi. Korištenjem kvazirecesijskih koeficijenata moguće je opisati dominantni mehanizam otjecanja u krškom vodonosniku.



Za određivanje kvazirecesijskih koeficijenata, kompozitna kvazirecesijska krivulja podijeljena je na dvije krivulje, koje su zatim prilagođene Mailletovoj jednadžbi zasnovanoj na eksponencijalnoj funkciji (Slika 4.27). Ovim postupkom izračunati su koeficijenti kvazirecesije za svaku pojedinačnu metodu, pri čemu su utvrđene prosječne vrijednosti koeficijenata kvazirecesije  $\alpha_1$  od 0,0082 i  $\alpha_2$  od 0,1103 (Tablica 4.10). Pomak u nagibu glavne kvazirecesijske krivulje ukazuje na promjenu vrijednosti koeficijenata kvazirecesije. Vrijednosti kvazirecesijskih koeficijenata sugeriraju na dominaciju baznog otjecanja nad direktnim otjecanjem. Ova pojava može se objasniti dominacijom stijenske matrice u kršu, što uzrokuje sporo otjecanje vode iz manjih pora i pukotina. Dominacija baznog otjecanja implicira važnu ulogu podzemnih voda u formiranju integralnih promjena volumena Crvenog jezera, zbog čega između ostalog i jezero nikada ne presušuje. Promjene u kvazirecesijskim koeficijentima događaju se oko razine izvora Opačac (Slika 4.27), što je bilo evidentno i kod vodostaja u Crvenom jezeru. Povezanost između izvora Opačac i Crvenog jezera dodatno je istražena analizom signala u vremenskoj i frekvencijskoj domeni.



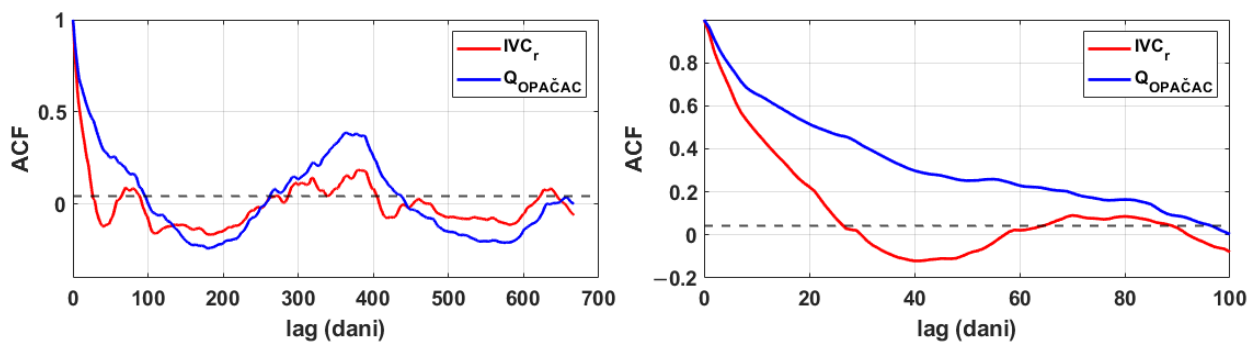
**Slika 4.27** Glavna recesijska krivulja dobivena korištenjem Prilagođene matching strip metode, Tabulation metode i metode po Petrasu

**Tablica 4.10** Vrijednosti kvazirecesijskih koeficijenata prema odabranim metodama

| Metoda                            | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ |
|-----------------------------------|------------|------------|
| Prilagođena matching strip metoda | 0,1001     | 0,0078     |
| Tabulation metoda                 | 0,1017     | 0,0067     |
| Metoda po Petrasu                 | 0,1291     | 0,0101     |
| Prosjek                           | 0,1103     | 0,0082     |

## 4.3.2. Analiza u vremenskoj i frekvencijskoj domeni

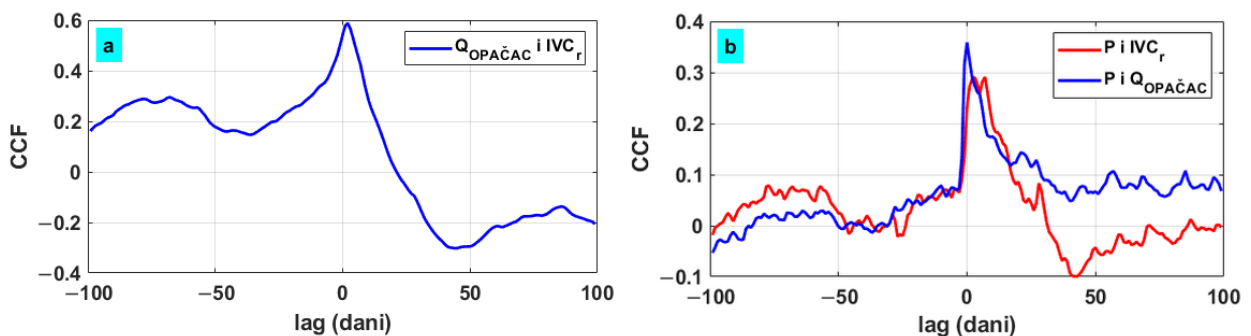
Analiza u vremenskoj domeni korištena je za određivanje autokorelacijske funkcije i funkcije kros-korelacije integralnih promjena volumena u Crvenom jezeru i protoka na izvoru Opačac, kao i kros-korelacijske funkcije oborina s integralnim promjenama volumena i protocima na Opačcu. Autokorelacijska funkcija (ACF) omogućava kvantificiranje memorijskog učinka sustava kroz vremensko zakašnjenje pri kojem vrijednost funkcije autokorelacije pada unutar intervala pouzdanosti od 95%, približno definirana kao  $\pm 2/\sqrt{N}$  (Mangin, 1984; Chatfield, 2016). Efekt memorije ukazuje na način skladištenja vode, odnosno na punjenje i pražnjenje podzemnih zaliha. Usporedbom autokorelacijskih funkcija Crvenog jezera i izvora Opačac zabilježen je efekt memorije od 26 dan u Crvenom jezeru te efekt memorije od 96 dana na izvoru Opačac (Slika 4.28). Ovakvi rezultati ukazuju na znatniju inertnost hidrogeološkog sustava Opačca u odnosu na sustav Crvenog jezera kod kojeg je zadržavanje vode u krškom sustavu mnogo kraće nego kod Opačca.



**Slika 4.28** Autokorelacijska funkcija integralnih promjena volumena u Crvenom jezeru i protoka na Opačcu

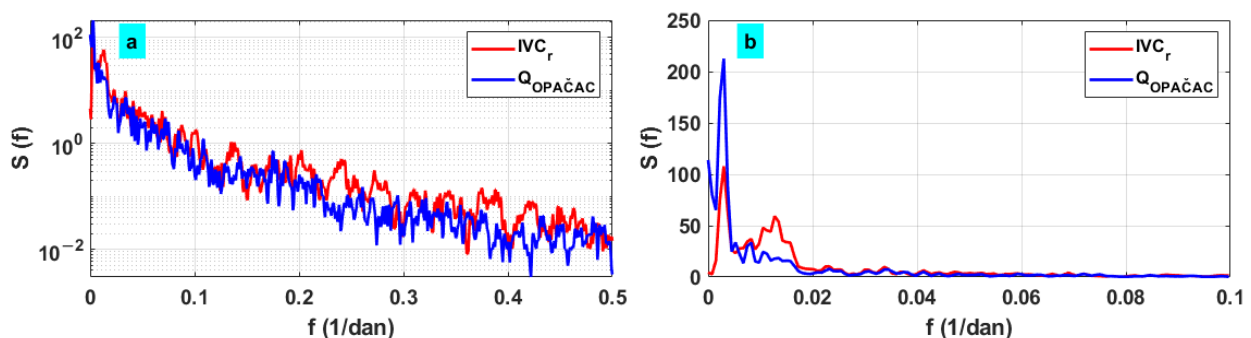
Kros-korelacijska funkcija (CCF) uzima vrijednosti od -1 do 1, pri čemu vrijednost 1 označava jaku korelaciju dviju promatranih serija, a -1 negativnu ili obrnutu korelaciju koja podrazumijeva kretanje varijabli u suprotnim smjerovima. Nekorelirane serije podataka imaju vrijednost kros-korelacijske funkcije blizu 0. Kros-korelacijska funkcija integralnih promjena volumena u Crvenom jezeru te protoka na Opačcu s odmakom (eng. lag) od 100 dana ukazuju na umjerenu povezanost tih dvaju sustava (Slika 4.29). Na povezanost sustava ukazuje nesimetričnost funkcije te statistički značajna vrijednost kros-korelacijske funkcije za lag od 3 dana, dok za veći broj dana vrijednost kros-korelacijske funkcije opada.

Kros-korelacijskom analizom prikazan je i odgovor sustava izvora Opačac i Crvenog jezera na pojedini kišni događaj. Usporedba je napravljena s podacima o količini oborina s mjerne postaje Imotski. Sustav Opačca dostiže najvišu vrijednost za lag od 0 dana, što implicira da sustav Opačca reagira na oborine bez vremenskog zakašnjenja, dok se odgovor Crvenog jezera na oborine javlja tek nakon 7 dana. Vrijednosti kros-korelacijske funkcije značajnije su kod sustava Opačca nego kod Crvenog jezera, što sugerira na to da Crveno jezero dobiva vodu podzemnim tokovima, a manjim dijelom iz oborina. Oba sustava pokazuju sličan trend kretanja kros-korelacijske funkcije, što ukazuje na njihovu međusobnu povezanost.



**Slika 4.29** Kros-korelacijska funkcija protoka na Opačcu i integralnih promjena volumena u Crvenom jezeru ( $IVC_r$ ) (a) te kros-korelacijska funkcija protoka na Opačcu i integralnih promjena volumena Crvenog jezera u kombinaciji s količinom oborina s mjerne postaje Imotski (b)

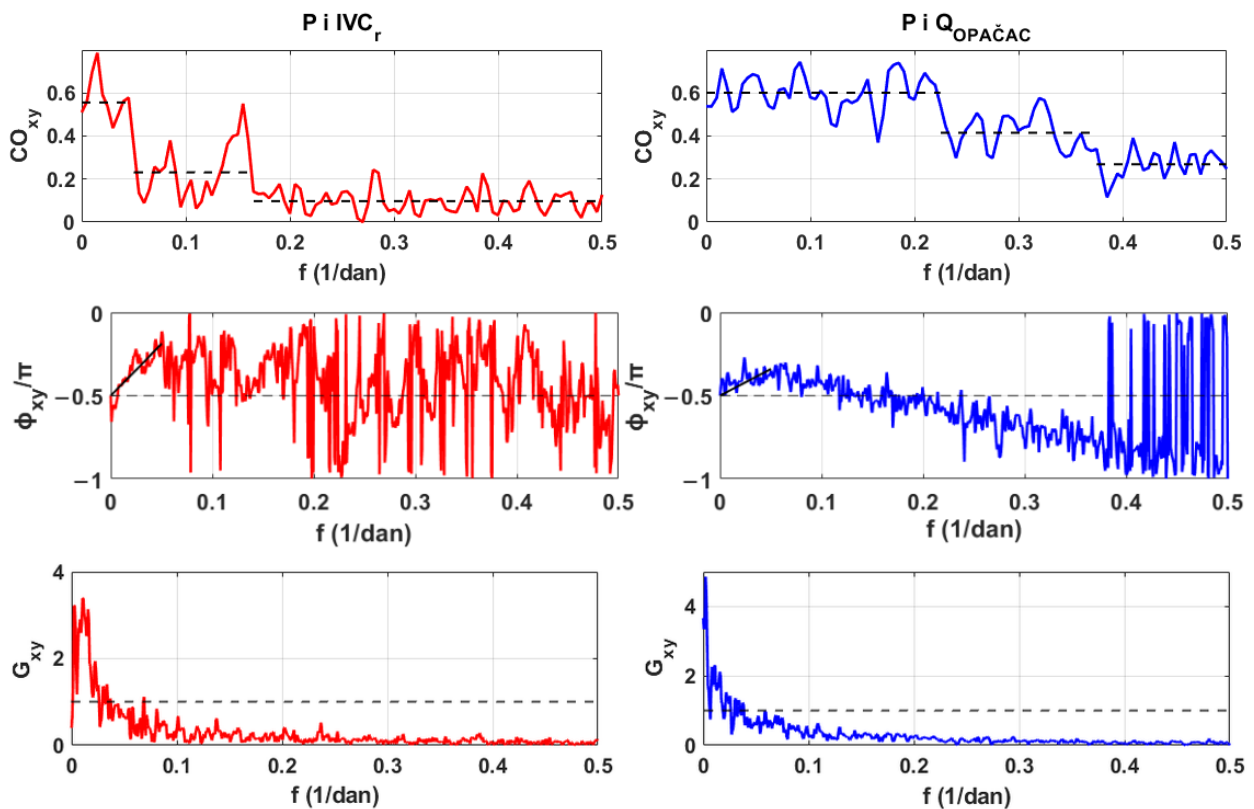
Spektralne funkcije gustoće  $S(f)$  izračunate su za vrijednosti integralnih promjena volumena u Crvenom jezeru te za protoke na Opačcu. Iz prikaza spektralne funkcije gustoće (Slika 4.30) evidentna je raspodjela snage analiziranih nizova unutar raspona niskih frekvencija. Kod Crvenog jezera i Opačca periodičnost se pojavljuje pri frekvenciji od 0,003 što odgovara razdoblju od 333 dana. Promatrana periodičnost odgovara razdoblju jedne hidrološke godine.



**Slika 4.30** Prikaz spektralne funkcije gustoće  $S(f)$  integralnih promjena volumena te protoka na Opačcu na logaritamskom (a) i linearnom mjerilu (b)

Kros spektralna analiza napravljena je između oborina s mjerne postaje Imotski, kao ulaznog signala, i protoka na izvoru Opačac, odnosno integralnih promjena volumena kao izlaznih signala. Funkcija kros spektralne gustoće sadrži informacije o amplitudi i fazi, a na temelju poznate vrijednosti iste definirana je i funkcija koherencije kojom se pokazuje reagiraju li varijacije u izlaznom signalu na istu vrstu varijacija u ulaznom signalu (Padilla & Pulido-Bosch, 1995).

Funkcije koherencije  $CO_{xy}$  za pojedine analizirane signale prikazane su na slici 4.31. Za oborine i integralne promjene volumena koherencija se gubi za frekvencije iznad 0,05 (razdoblja kraća od 20 dana), dok pri usporedbi signala oborina s protocima na Opačcu koherencija se gubi za frekvencije iznad 0,23 (razdoblja kraća od 4 dana). Trend kretanja vrijednosti koherencije između oborina i Opačca značajno je viši od trenda kretanja koherencije između oborina i integralnih promjena volumena u Crvenom jezeru, što ukazuje na dominaciju baznog otjecanja u Crvenom jezeru u usporedbi s Opačcem, gdje je direktno otjecanje izraženije.



**Slika 4.31** Funkcija koherencije  $CO_{xy}$ , faza funkcija  $\Phi_{xy}$  i funkcija prigušenja ili pojačanja  $G_{xy}$  oborina s integralnim promjenama volumena u Crvenom jezeru i protocima na Opačcu

Funkcija faze  $\Phi_{xy}$  prikazuje kašnjenje između dvaju promatranih signala, oborina na mjernoj postaji Imotski u kombinaciji sa integralnim promjenama volumena u Crvenom jezeru te protocima na Opačcu pri različitim frekvencijama (Slika 4.31). Ponašanje signala slično je kao i kod funkcije koherencije. Funkcija faze za Crveno jezero bilježi dobro poravnanje do frekvencije od 0,05, a za Opačac do frekvencije od 0,23. Za više frekvencije od navedenih dolazi do slabljena ulaznog signala, odnosno prigušenja. Na temelju funkcije faze moguće je i definirati prosječno zakašnjenje (eng. *mean delay*) koje je jednako nagibu linije trenda koja prolazi ishodištem koordinatnog sustava (Padilla & Pulido-Bosch, 1995):

$$d = \frac{\phi_{xy}(f)}{2\pi f} \quad (41)$$

Prosječno zakašnjenje između količina oborina te integralnih promjena volumena iz Crvenog jezera jednako je 12 dana, dok je za Opačac jednako 6 dana.

Temeljem poznatih vrijednosti amplitude kros-spektra i spektralne funkcije gustoće ulaznog signala definirana je funkcija prigušenja ili pojačanja, ovisno o vrijednosti  $G_{xy}$ . Iz dobivenih funkcija vidljivo je prigušenje ulaznog signala pri visokim frekvencijama te pojačanje istog pri niskim frekvencijama. Pri analizi oborina i integralnih promjena volumena iz Crvenog jezera bilježi se prigušenje ulaznog signala za frekvencije iznad 0,036, dok kod oborina i protoka na Opačcu za frekvencije iznad 0,0038.

#### 4.4. Istraživački monitoring vodnih tijela

Analiza podataka s hidroloških postaja od ključne je važnosti za razumijevanje i upravljanje vodnim resursima. Istraživački monitoring proveden na hidrološkim postajama novouspostavljenog sustava omogućava kontinuirano prikupljanje hidroloških parametara, pružajući uvid u stanje vodnih tijela i međusobne hidrološke odnose.

Prikupljeni podaci s novouspostavljenog sustava variraju u vremenskom trajanju zbog otežanih uvjeta rada i nepristupačnog terena, što je utjecalo na potrebni vremenski tijek instalacije opreme i uspostavu rada hidroloških postaja. Također, zbog tehničkih problema s mjernim sondama u Crvenom i Modrom jezeru te u Knezovića jezeru, ne raspolaže se s cjelovitim vremenskim nizovima podataka. Ipak, s obzirom na to da ranije nije postojao kontinuirani monitoring parametara u krškim jezerima, analiza čak i nepotpunih podataka pruža bolji uvid u fluktuacije razina vode u jezerima i njihovu međusobnu povezanost.

Analiza razina vode provedena je za hidrološke postaje Ričice, Galipovac, Mamića jezero, Knezovića jezero, Crveno jezero, Modro jezero i Prološko blato, koristeći sve dostupne nizove podataka (Slika 4.32). Za usporednu analizu korišteni su i podaci o količini oborina s novouspostavljene meteorološke postaje Runovići, koji se prikupljaju u intervalima od 10 minuta te su za potrebe analize svedeni na razinu sata. Podaci o razinama vode prikupljaju se na razini sata te predstavljaju relativnu visinu vode u jezeru u odnosu na poziciju mjerne sonde. Relativne visinske kote transformirane su u apsolutne visinske kote s obzirom na izvršena geodetska mjerenja jezera kako bi se osigurala točnost i usporedivost podataka. Apsolutne kote omogućuju točno određivanje visine vode u odnosu na fiksnu referentnu točku (Tablica 4.11), što je važno za standardizaciju podataka, geodetsku točnost, pouzdano praćenje promjena razine vode te integraciju s drugim geografski relevantnim podacima.

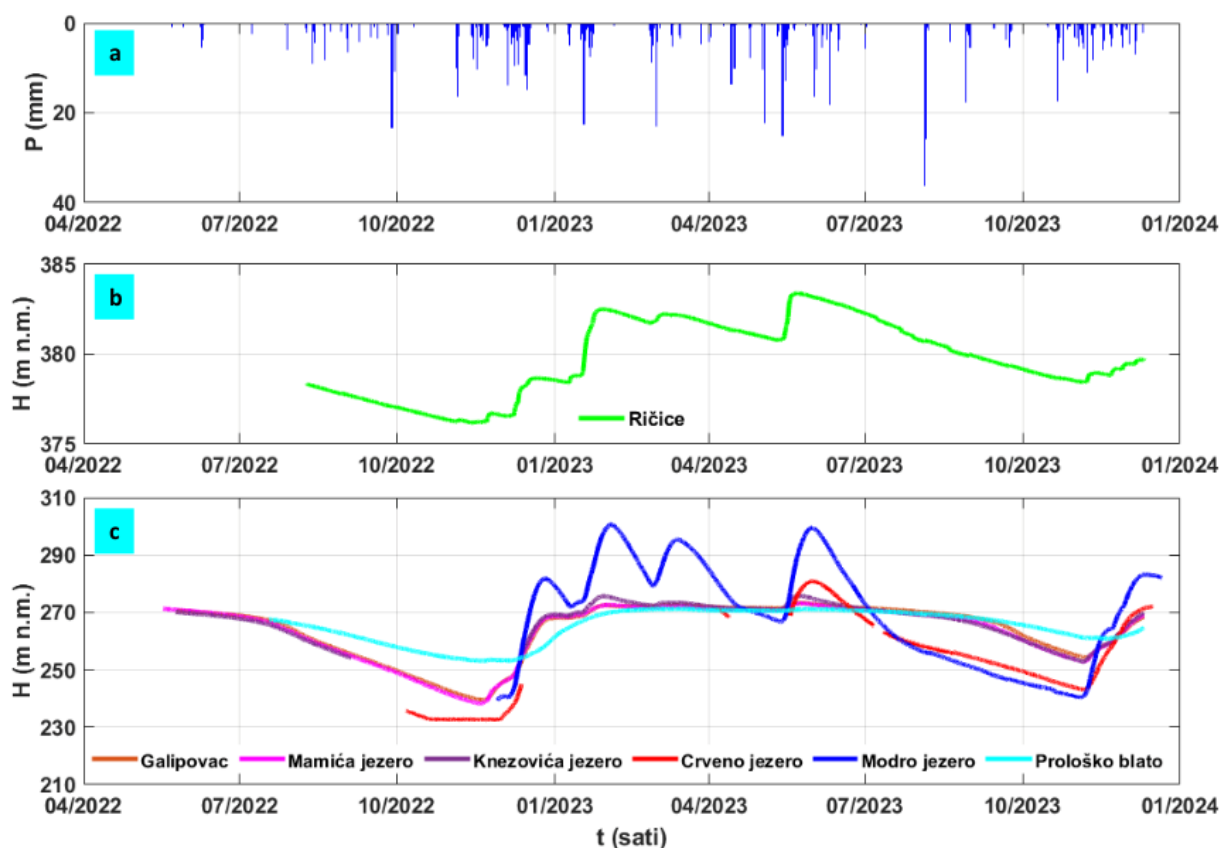
Geodetska mjerenja površina jezera vršena su od strane ovlaštenog geodetskog inženjera. Prološko blatno snimano je direktno GPS-om zbog lake pristupačnosti jezeru, dok su Modro jezero, Galipovac te Knezovića i Mamića jezero snimani totalnom stanicom upotrebom lasera. Crveno jezero zbog nepristupačnosti terena te nepovoljnih uvjeta za izvršenje geodetskih mjerenja gore spomenutom opremom snimano je totalnom stanicom upotrebom prizme uz asistenciju planinara obučanih za rad u takvim uvjetima.

**Tablica 4.11** Pregled kota nula mjernih uređaja na hidrološkim postajama

| Postaja          | Kota nule (m n.m.) | Dostupnost podataka  |
|------------------|--------------------|--|
| Ričice           | 374,22             | 09.08.2022. 13 <sup>00</sup> – 10.12.2023. 07 <sup>00</sup>  |
| Galipovac        | 237,68             | 25.05.2022. 12 <sup>00</sup> – 10.12.2023. 11 <sup>00</sup>  |
| Mamića jezero    | 238,70             | 18.05.2022. 12 <sup>00</sup> – 10.12.2023. 06 <sup>00</sup>  |
| Knezovića jezero | 254,31             | 24.05.2022. 15 <sup>00</sup> – 03.09.2022. 11 <sup>00</sup><br>11.12.2022. 10 <sup>00</sup> – 10.12.2023. 15 <sup>00</sup>   |
| Prološko blato   | 246,99             | 18.07.2022. 12 <sup>00</sup> – 10.12.2023. 06 <sup>00</sup>  |
| Crveno jezero    | 232,31             | 07.10.2022. 12 <sup>00</sup> – 12.12.2022. 14 <sup>00</sup><br>07.04.2023. 05 <sup>00</sup> – 12.04.2024. 05 <sup>00</sup><br>18.05.2023. 13 <sup>00</sup> – 05.07.2023. 09 <sup>00</sup><br>13.07.2023. 14 <sup>00</sup> – 15.12.2023. 07 <sup>00</sup> |
| Modro jezero     | 241,13             | 28.11.2022. 13 <sup>00</sup> – 21.12.2023. 10 <sup>00</sup>  |

Razine u svim jezerima pokazuju sličnu pojavnost vršnih vrijednosti sukladno prisutnosti oborina, odnosno sugeriraju na slične hidrološke odgovore s obzirom na prisutnost i količinu oborina. Nasuprot tome, fluktuacije razina vode u jezerima su znatno različite i ukazuju na složene hidrološke odnose u ovom krškom vodonosniku.

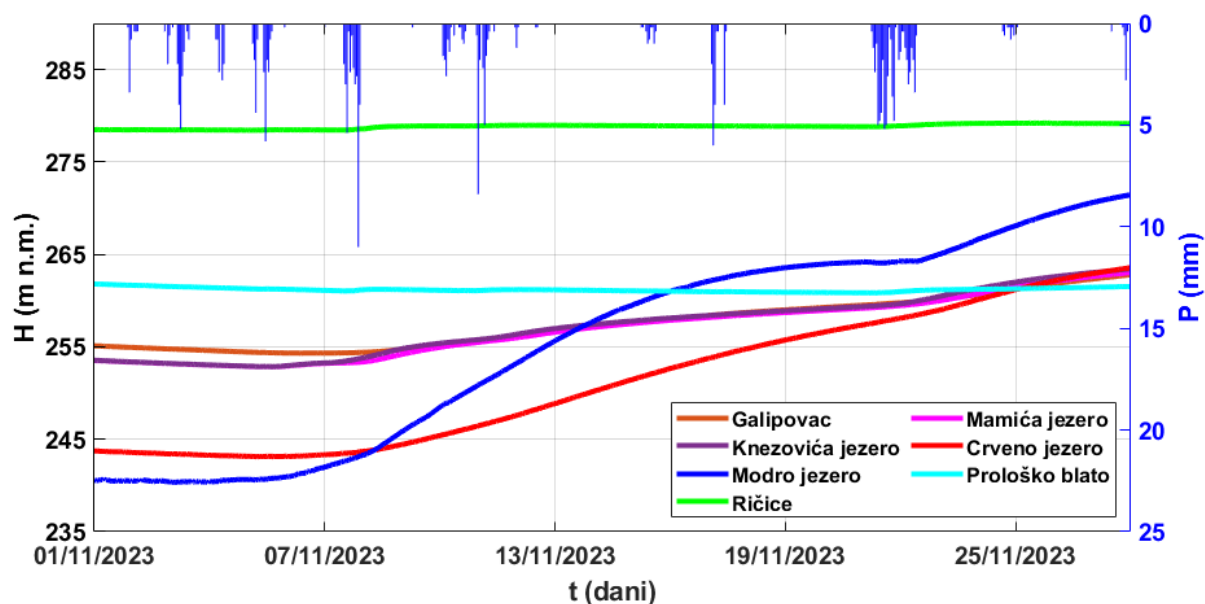
Najmanje fluktuacije zabilježene su u akumulaciji Ričice, što može biti posljedica njenog različitog geološkog sastava u odnosu na ostala jezera. Naime, na području Ričica prisutne su paleogenske naslage lapora i pješčenjaka, dok su sva ostala jezera, osim Prološkog blata, smještena u propusnim karbonatnim stijenama. Prološko blato također bilježi nešto manje fluktuacije u usporedbi s ostalim jezerima, što je posljedica smještaja u kvartarnim naslagama aluvija koje stvaraju nepotpunu barijeru tečenju voda (Bojanić i ostali, 1981), ali i nemogućnosti značajnog porasta razine vode uslijed prelijevanja vode prema jugoistočnom dijelu polja. Razine u Lokvičićkim jezerima – Galipovcu, Mamića i Knezovića jezeru ukazuju na identične hidrološke režime, što se može objasniti zakonom spojenih posuda kod kojeg su razine vode u povezanim posudama jednake, a kretanje vode između njih slobodno. Navedeno potvrđuje tvrdnje da su Galipovac, Mamića i Knezovića jezero dio istog krškog vodonosnika (Bonacci & Roje-Bonacci, 2000b, 2000a). Fluktuacije vode kod Lokvičićkih jezera znatno su manje u usporedbi s Crvenim i Modrim jezerom, osobito u razdobljima maksimalnih vršnih vrijednosti.



**Slika 4.32.** Prikaz hijetograma s meteorološke postaje Runovići (a), kretanja razina vode u Ričicama (b) te Galipovcu, Mamića jezeru, Knezovića jezeru, Crvenom i Modrom jezeru i u Prološkom blatu (c)

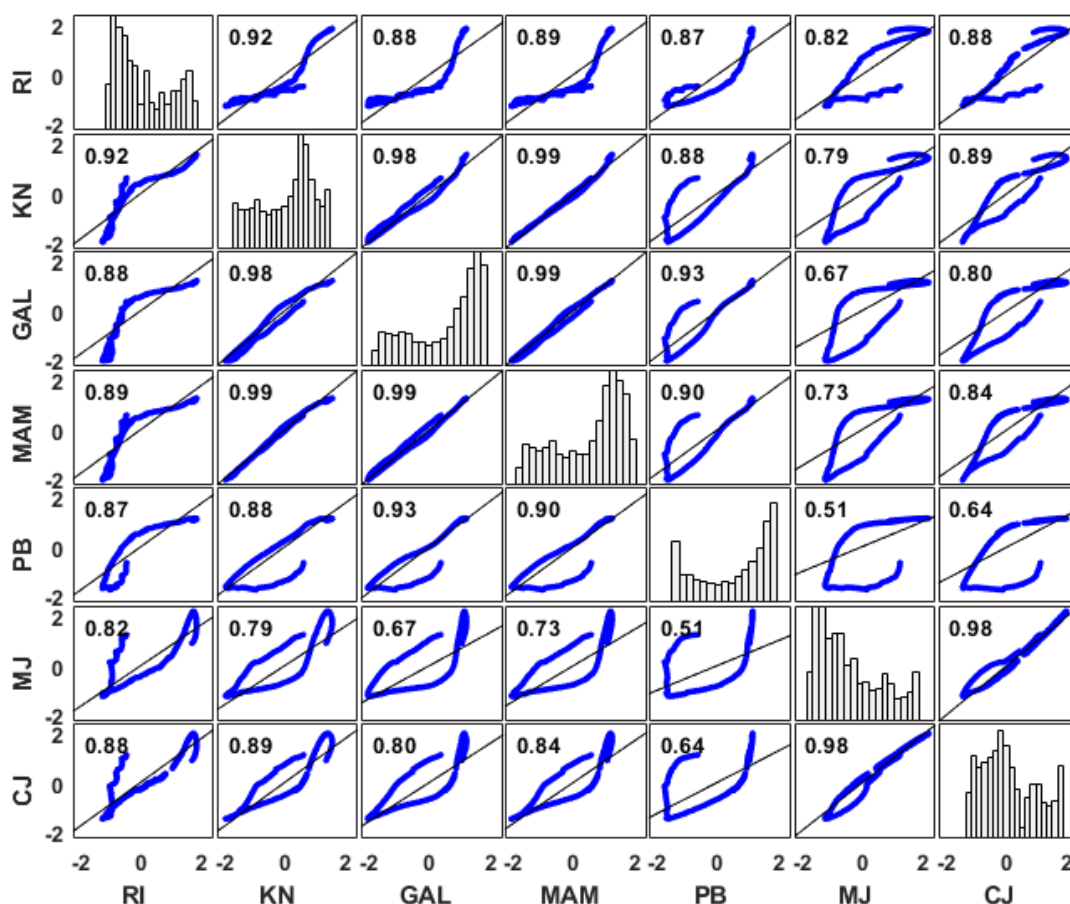
Crveno i Modro jezero bilježe slične fluktuacije u razinama, premda su varijacije kod Modrog jezera znatno izražajnije. Upravo zbog izrazitih razlika u oscilacijama razina koje mogu biti od dva do pet puta više kod Modrog jezera nego kod Crvenog, Petrik (1960) razdvaja hidrološke režime tih dvaju jezera, ali im naglašava zajedničko podrijetlo voda. S obzirom da do uspostave ovog monitoring sustava nije bilo paralelnih mjerenja u tim dvama jezerima, isto se nije moglo potvrditi. Međutim analizom prikupljenih podataka uočeno je da su fluktuacije u oba jezera veoma slične što može značiti da se dijelovi njihovih slivova poklapaju (Andrić i ostali, 2018) te da su oba jezera dio istog krškog vodonosnika (Bonacci & Roje-Bonacci, 2000a, 2000b, 2008). Kod oba jezera uočeno je da je stopa porasta razine vode znatno izraženija od stope opadanja razine što se može dovesti u vezu s utjecajem podzemnih voda na prihranjivanje jezera (Bonacci i ostali, 2014). Osim utjecaja podzemnih voda, evidentan je i utjecaj oborina na kretanje razine vode u Modrom jezeru što je vidljivo iz podudarnosti vršnih vrijednosti razina s vršnim vrijednostima oborina. Sporije opadanje razine vode u Crvenom jezeru u odnosu na Modro može se pripisati utjecaju regionalnog toka vode u Dinarskom kršu na formiranje toka u Crvenom jezeru (Vrsalović i ostali, 2022).





**Slika 4.33** Prikaz hijetograma s meteorološke postaje Runovići te promjene razina vode u Galipovcu, Mamića jezeru, Knezovića jezeru, Crvenom jezeru, Modrom jezeru, Prološkom blatu i Ričicama (razine prilagođene umanjnjem od 100 m zbog grafičke preglednosti) za razdoblje od 1. do 28. studenog 2023. godine.

Dnevne fluktuacije razina vode u jezerima jasnije su prikazane na slici 4.33, gdje su prikazana kretanja razina vode u jezerima zajedno s hijetogramom s meteorološke postaje Runovići za razdoblje od 1. do 28. studenog 2023. godine. Kao što je prethodno navedeno, najmanje fluktuacije razina zabilježene su u jezeru Ričice i Prološkom blatu, dok Lokvičića jezera gotovo identično reagiraju na oborine. Modro i Crveno jezero bilježe najizraženije odgovore na oborine, posebno Modro jezero, što dodatno potvrđuje najmanji memorijski efekt prema rezultatima autokorelacijske funkcije (Slika 4.36), upućujući na dinamičniji hidrolški sustav Modrog jezera.



**Slika 4.34** Matrica korelacija između razina vode u Ričicama (RI), Knezovića jezeru (KN), Galipovcu (GAL), Mamića jezeru (MAM), Prološkom blatu (PB), Modrom jezeru (MJ) i Crvenom jezeru (CJ)

Identifikacija međusobne povezanosti jezera na imotskom području izvršena je korištenjem Pearsonovog koeficijenta korelacije kao kvantitativne mjere povezanosti promatranih varijabli. Koeficijenti korelacije, zajedno s dijagramima raspršenja koji prikazuju odnos između parova varijabli te histogramima koji prikazuju distribuciju vrijednosti unutar svake varijable, prikazani su u matrici korelacija (Slika 4.34). Rasponi koeficijenata korelacije su definirani tablici 4.12 koja prikazuje interpretaciju povezanosti varijabli na temelju veličine koeficijenta korelacije.

**Tablica 4.12** Tumačenje vrijednosti Pearsonovog koeficijenta korelacije (Schober i ostali, 2018)

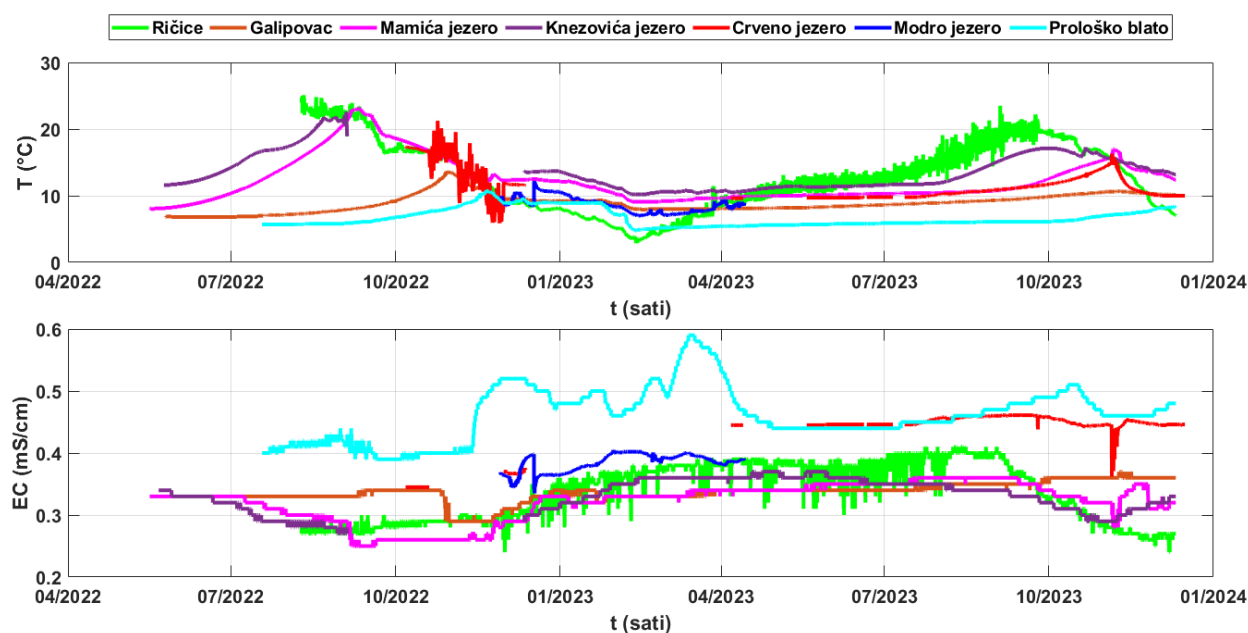
| Vrijednost koeficijenta korelacije | Interpretacija povezanosti varijabli |
|------------------------------------|--------------------------------------|
| 0,9 – 1                            | Veoma visoka                         |
| 0,7 – 0,89                         | Visoka                               |
| 0,5 – 0,69                         | Umjerena                             |
| 0,3 – 0,49                         | Mala                                 |
| 0 – 0,29                           | Neznatna                             |

Koeficijenti korelacije između razina u jezerima ukazuju na umjerenu do veoma visoku povezanost (Slika 4.34). Isto je vidljivo i na grafovima kretanja razina vode, gdje se uočava podudarnost vršnih vrijednosti i slične reakcije jezera na oborine i dotok vode. Visoke vrijednosti korelacije te koincidentno kretanje razina voda u jezerima ukazuju da su promatrana jezera dio istog krškog vodonosnika. Najniže vrijednosti korelacije s drugim jezerima pokazuje Modro jezero, osobito u odnosu na Prološko blato s vrijednošću koeficijenta korelacije od 0,51. To se može pripisati značajnom utjecaju oborina na promjene razine vode u Modrom jezeru, dok je kod Prološkog blata dominantan utjecaj podzemnih voda, što potvrđuju i vrijednosti električne vodljivosti i temperature vode mjereni na lokaciji mjernog uređaja (Slika 4.35). Unatoč znatno manjim fluktuacijama razine vode u akumulaciji Ričice u odnosu na ostala jezera (Slika 4.32), Ričice pokazuju visoke i vrlo visoke koeficijente korelacije sa svim jezerima (Slika 4.34).

Galipovac, Knezovića i Mamića jezero bilježe vrlo visoke vrijednosti koeficijenata korelacije što još jednom potvrđuje tvrdnju o njihovom hidrološkom funkcioniranju istovjetnom principu spojenih posuda. Visoke vrijednosti korelacije od 0,98 također bilježe i Crveno i Modro jezero što je vidljivo i iz podudarnosti kretanja razine vode.

Parametri temperature i električne vodljivosti pružaju dublji uvid u hidrološku dinamiku jezera. Temperatura ukazuje na termalne promjene uzrokovane atmosferskim uvjetima te dotokom vode i njenim miješanjem, dok električna vodljivost, kao važan parametar mineraloškog sastava, odražava prisutnost otopljenih tvari. Voda, prolazeći kroz tlo i stijene, otapa minerale i druge tvari, čime povećava koncentraciju otopljenih tvari, što u analizi električne vodljivosti može značiti veći doprinos podzemnih voda. Također, kod prijelaznih voda i vodonosnika bližih obali, električna vodljivost može ukazivati na prisutnost soli.

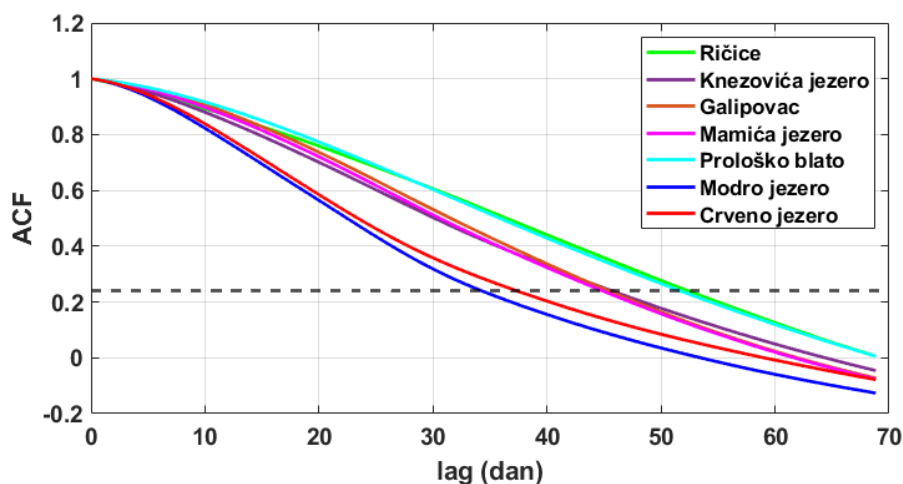
Pri analizi prikupljenih podataka o električnoj vodljivosti i temperaturi važno je uzeti u obzir da su mjerenja vršena isključivo u točki položaja senzora koji varira od jezera do jezera. Položaj senzora značajno utječe na interpretaciju podataka jer određuje dinamiku promatranih parametara. Tako položaj senzora bliže površini mjeri temperature vode bliže temperaturama zraka, dok će senzor postavljen na većim dubinama zabilježiti stabilnije i niže temperature, te potencijalno različite vrijednosti električne vodljivosti zbog manjeg utjecaja atmosferskih uvjeta i razrjeđenja otopljenih tvari. Budući da su mjerenja vršena isključivo u jednoj točki i nedostaju informacije o temperaturnom profilu i položaju termokline, nije bilo moguće provesti potpunu usporedbu parametara u jezerima, već se analiza temelji na praćenju promjena parametara pojedinačno unutar svakog jezera na specifičnoj točki mjerenja.



**Slika 4.35** Prikaz kretanja temperature vode (T) i električne vodljivosti (EC) u jezerima za raspoložive nizove podataka

Analizom prikupljenih podataka evidentirano je najizraženije zagrijavanje vode u akumulaciji Ričice koja bilježi izrazite fluktuacije temperature u toplijim mjesecima tijekom dana i noći (Slika 4.35). Fluktuacije u Crvenom jezeru zabilježene u studenom i prosincu 2022. godine posljedica su tehničke pogreške senzora tijekom mjerenja. Ova nepravilnost može se objasniti ulaskom vode u mjernu ćeliju senzora, što je rezultiralo zagrijavanjem vode tijekom dana i njenim hlađenjem tijekom noći. Nakon što je voda napustila senzor, mjerenja su se stabilizirala. Najniže temperature, ali i najviše vrijednosti električne vodljivosti bilježe se u Prološkom blatu što može biti posljedica prisutnosti vode koja je duže vremena bila u podzemlju (Slika 4.35). Više vrijednosti električne vodljivosti evidentiraju se i u Crvenom jezeru koje se zbog utjecaja podzemnih voda smatra prirodnim piezometrom (Bonacci & Roje-Bonacci, 2000a, 2008).

Autokorelacijska analiza napravljena je za razdoblje preklapanja podataka, u periodu od 18. svibnja 2023. godine u 12 h do 10. prosinca 2023. godine u 11 h. Za navedeni period kod Crvenog jezera se nije raspolagalo s podacima u trajanju od par dana te su isti nadomješteni linearnom interpolacijom. Usporedbom autokorelacijskih funkcija primijećeni su slični memorijski učinci između Crvenog i Modrog jezera, te između Lokvičića jezera i akumulacije Ričice s Prološkim blatom (Slika 4.36). Modro jezero bilježi najmanji memorijski učinak od 34 dana, dok Ričice i Prološko blato pokazuju najveći učinak s efektom memorije od 52 dana. Galipovac, Mamića jezero i Knezovića jezero bilježe isti efekt memorije od 45 dana (Slika 4.36). Dulji efekt memorije u Prološkom blatu i Ričicama sugerira inertniji hidrološki sustav i dulje zadržavanje vode u podzemlju.



Slika 4.36 Autokorelacijske funkcije (ACF) razina vode u jezerima

#### 4.5. Sažetak rezultata istraživanja

Klimatološkom analizom proučavana je dinamika temperature zraka i količine oborina s ciljem identifikacije postojećih klimatskih trendova i fluktuacija, što doprinosi boljem razumijevanju varijacija hidroloških parametara na istraživanom području. Analizom temperature zraka uočen je statistički značajan porast srednjih i maksimalnih godišnjih temperatura zraka na postaji Imotski (Slika 4.3) te statistički značajan porast srednjih godišnjih temperatura na postaji Ričice (Slika 4.2). Minimalne godišnje temperature su u opadanju na obje postaje, ali evidentirani trendovi nisu statistički značajni. Rezultati SNHT testa pokazuju da se na obje postaje bilježe statistički značajne promjene u temperaturnim trendovima tijekom vremena. Na postaji Imotski zabilježen je statistički značajan pomak srednjih godišnjih temperatura nakon 2007. i maksimalnih godišnjih temperatura nakon 1998. godine (Slika 4.3), dok je na postaji Ričice zabilježen statistički značajan pomak srednjih godišnjih temperatura nakon 2011. i maksimalnih godišnjih temperatura nakon 1998. godine (Slika 4.2). Oborinski trend na postaji Ričice je negativan, dok je na postaji Imotski pozitivan (Slika 4.7). Razlike u temperaturi i oborinama na dvjema postajama posljedica su različitih duljina vremenskih serija i utjecaja lokalnih čimbenika. Utjecaj lokalnih čimbenika posebno se očituje u količini oborina, koja ovisi o vlažnosti zračnih masa, intenzitetu i smjeru strujanja zraka te o vertikalnoj komponenti gibanja, koja može biti znatno modificirana lokalnim utjecajima poput reljefa, prisutnosti i smjera planinskih lanaca, pravaca dominantnih vjetrova te blizine slobodnih vodnih površina (Gajić-Čapka i ostali, 2003, 2015). Značajna prostorna varijabilnost oborina i različiti trendovi opaženi na različitim postajama otežavaju donošenje jedinstvenog zaključka o stvarnom trendu režima oborine na ovom području (Gajić-Čapka i ostali, 2003). Varijabilnost oborina je visoka na mjesečnoj razini, ali niska na godišnjoj razini. PCI

vrijednosti na obje postaje dale su iste rezultate, što ukazuje na sezonsku raspodjelu oborina (Slika 4.9). Iako je trend PCI vrijednosti na postaji Imotski u opadanju, obje postaje imaju visoku ili vrlo visoku vrijednost PCI, što ukazuje na izraženu sezonalnost, odnosno velike razlike između oborinskih i bezoborinskih razdoblja. Broj sušnih razdoblja raste na Ričicama, a opada na postaji Imotski, dok se intenzitet sušnih razdoblja povećava. Obje postaje također pokazuju povećanje broja kišnih godina. Vrijednosti SRA ukazuju na prisutnost ekstremnih događaja, bilo sušnih ili izrazito kišnih godina (Slika 4.11).

Hidrološkom analizom proučavane su fluktuacije u količini voda kroz analizu vodostaja i protoka na hidrološkim mjernim postajama DHMZ-a. Analiza je provedena za minimalne, srednje i maksimalne godišnje vrijednosti. Analizom vodostaja na postaji Ričice utvrđeno je statistički značajno smanjenje minimalnih godišnjih vodostaja (Slika 4.13). Srednji i maksimalni godišnji vodostaji su također u opadanju, ali evidentirani trendovi nisu statistički značajni. Uočeni trendovi smanjenja vodostaja mogu biti posljedica postojećeg problema propusnosti same akumulacije, ali i evidentiranih klimatskih varijacija na klimatološkoj postaji Ričice na kojoj je zabilježeno statistički značajno povećanje srednjih godišnjih temperatura zraka kao i porast sušnih razdoblja te povećanje intenziteta istih. Hidrološke postaje Ustava i Šumet bilježe blagi trend porasta vodostaja te protoka nakon 1989. godine, godine izgradnje akumulacije Ričice, čiji se utjecaj jasno vidi na uočenim statistički značajnim promjenama u srednjoj vrijednosti u periodu izgradnje akumulacije. Na hidrološkoj postaji Opačac-Vrlička detektiran je statistički značajan porast srednjih i maksimalnih godišnjih vodostaja (Slika 4.17), dok su minimalni, srednji i maksimalni godišnji protoci u opadanju (Slika 4.18), ali evidentirani trendovi nisu statistički značajni. Isto se može objasniti nanosima u koritu Vrličke što potvrđuju i rezultati SNHT testa koji detektiraju statističke značajne promjene u kretanju vodostaja i nepostojanost promjena, odnosno homogenost podataka u kretanju protoka. Minimalni, srednji i maksimalni godišnji vodostaji na postaji Kamenmost su u opadanju (Slika 4.22), ali evidentirani trendovi nisu statistički značajni. Analizom protoka na postaji Kamenmost uočeno je statistički značajno smanjenje srednjih i maksimalnih godišnjih protoka (Slika 4.23). SNHT testom evidentirane su statističke značajne promjene u razdoblju od 1956. do 1960. godine koje mogu biti posljedica provedenih zahvata na Prološkom blatu, ali i zahvata na uzvodnijim dijelovima sliva. Analizom temperatura vode na postaji Kamenmost evidentirani su statistički značajni porasti minimalnih i srednjih godišnjih temperatura (Slika 4.24).

Analizom oborina s mjerne postaje Imotski i integralnih promjena volumena u Crvenom jezeru utvrđeno je da kratkotrajne oborine nemaju značajnijeg utjecaja na hidrodinamiku jezera. Kolebanja u integralnim promjenama volumena bilježe se nakon intenzivnih oborina ili nakon popunjavanja podzemnih rezervi u krškim provodnicima, porama i pukotinama, pri čemu dolazi do aktiviranja podzemnih tokova. Oscilacije u jezeru ponajprije su posljedica djelovanja regionalnog toka vode u Dinarskom kršu koji se formira na širem području prihranjivanja i bitno ovisi o klimatskim i meteorološkim parametrima unutar dinarskog pojasa. Rezultati kros-korelacijske analize pokazuju da Crveno jezero reagira na oborine tek nakon 7 dana za razliku od Opačca koji reagira bez vremenskog odmaka, čime se potvrđuje važnost podzemnih voda i regionalnog toka u hidrološkom režimu Crvenog jezera (Slika 4.29). Izdvajanjem i dekompozicijom kvazirecesijskih krivulja detektirani su različiti hidrološki režimi uz evidentnu dominaciju baznog otjecanja (Slika 4.27). Registrirani veći vremenski odmak kod funkcije faze, kao i znatno viši trend kretanja koherencije oborina s hidrološkim sustavom Opačca nego s hidrološkim sustavom Crvenog jezera također potvrđuju isti zaključak o prevladavajućem mehanizmu punjenja i pražnjenja jezera (Slika 4.31). Diskontinuitet nagiba na grafu integralnih promjena volumena kao i promjena kvazirecesijskog koeficijenta koji se događaju na otprilike nadmorskoj visini od 268,5 m n.m., visini izvora Opačca, upućuju na povezanost tih dvaju sustava i moguću prisutnost provodnika između njih (Slika 4.26). Autokorelacijska analiza ukazuje na dinamičniji hidrološki sustav Crvenog jezera u usporedbi s inertnijim sustavom Opačca koji bilježi dulji memorijski efekt (Slika 4.28). Isto potvrđuje tezu o formiranju protoka na Opačcu na osnovi sve faze poroznosti krške matrice (Andrić i ostali, 2018).

Analizom podataka s novouspostavljenih postaja utvrđeno je da sva imotska jezera pokazuju slične hidrološke odgovore na oborine, dok fluktuacije razina među jezerima variraju, ukazujući na složene hidrološke procese u ovom krškom vodonosniku (Slika 4.32). Najmanje fluktuacije zabilježene su u akumulaciji Ričice, što se može pripisati njenom specifičnom geološkom sastavu s paleogenskim naslagama u usporedbi s ostalim jezerima koja se nalaze u propusnim karbonatnim stijenama. Lokvičićka jezera (Galipovac, Mamića i Knezovića jezero) pokazuju visoku međusobnu korelaciju, sugerirajući njihovu hidrološku povezanost koja se može objasniti zakonom spojenih posuda. Crveno i Modro jezero bilježe slične fluktuacije, no s izraženijim varijacijama kod Modrog jezera, što može ukazivati na moguće preklapanje njihovih slivova te značajniji utjecaj oborina na kretanje razina vode u Modrom jezeru. Parametri električne vodljivosti i temperature vode dodatno objašnjavaju hidrološke procese, ukazujući na prisutnost podzemnih voda (Slika 4.35). Koeficijenti korelacije pokazuju umjerenu do visoku povezanost

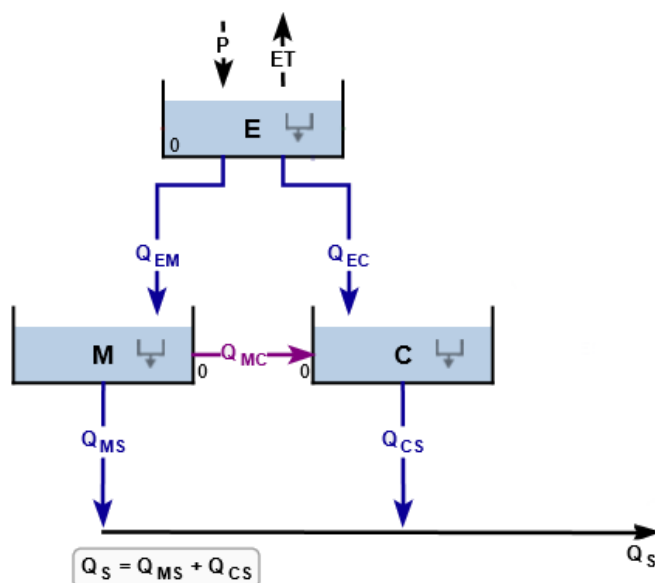
razina vode u jezerima, potvrđujući da su sva jezera dio istog krškog vodonosnika (Slika 4.34). Analizom autokorelacijskih funkcija zabilježeni su dulji efekti memorije kod Ričica i Prološkog blata, sugerirajući na dulje zadržavanje vode u podzemlju i inertnije hidrološke sustave (Slika 4.36).



## 5. MODELIRANJE HIDRODINAMIKE KRŠKOG VODONOSNIKA

### 5.1. Izrada modela u KARSTMOD-u

S obzirom na kompleksnost funkcioniranja krškog vodonosnika šireg područja Imotskog polja, izrada hidrološkog modela izvora Opačac zahtijevala je korištenje klasične konfiguracije modela te aktivaciju više odjeljaka. Tako odjeljak *E* simulira procese u epikršu, odakle se voda distribuira prema odjeljku *M* koji predstavlja kršku matricu, te odjeljku *C* koji predstavlja krške provodnike (Slika 5.1).



Slika 5.1 Struktura modela izvora Opačac

Ulazne varijable sustava su količina oborina pala na sliv (P) te referentna evapotranspiracija (ET). Referentna evapotranspiracija izračunata je prema Hargreavesovoj metodi opisanoj u poglavlju Metodologija. Promatrani period je od 1. siječnja 1995. godine do 31. prosinca 2021. godine.

U nastavku su dani matematički izračuni za protoke korištene u strukturi modela izvora Opačac dobiveni klasičnom konfiguracijom modela. Protoci između odjeljaka  $Q_{EM}$ ,  $Q_{EC}$  i  $Q_{MC}$ , kao i protoci između odjeljaka M i C i izlaza  $Q_{MS}$  i  $Q_{CS}$ , mogu se generalno opisati protokom  $Q_{AB}$  koji predstavlja tok vode iz odjeljaka A prema odjeljku B (Slika 5.2). Navedeni protoci definirani su kao protoci po jedini površine i opisuju se sljedećim izrazom

$$Q_{AB} = k_{AB} \left( \frac{A}{L_{ref}} \right)^{\alpha_{AB}} \quad (42)$$

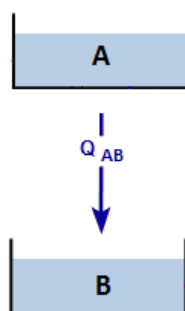
gdje je:

$k_{AB}$  – specifični koeficijent otjecanja iz odjeljaka A prema odjeljku B [L/T]

A – razine vode u odjeljku A [L]

$L_{ref}$  – jedinična duljina [L]

$\alpha_{AB}$  – eksponent [-]



**Slika 5.2** Generalni prikaz strukture modela s dva odjeljka A i B

Pri izračunu protoka između odjeljaka, korištena je pretpostavka da se u krškoj matrici odvija kapilarni tok s linearnim zakonom ( $\alpha_{AB}=1$ ), dok se u krškim provodnicima odvija turbulentni tok s nelinearnim zakonom toka ( $\alpha_{AB} \neq 1$ ) (Sivelle i ostali, 2019).

Promjene razine vode u vremenima u odjeljcima E, M i C definiraju se sljedećim izrazima:

$$\frac{dE}{dt} = P - ET - Q_{EM} - Q_{EC} \quad (43)$$

$$\frac{dM}{dt} = Q_{EM} - Q_{MS} - Q_{MC} \quad (44)$$

$$\frac{dC}{dt} = Q_{EC} + Q_{MC} - Q_{CS} \quad (45)$$

Dok veličina protoka na izvoru  $Q_S$  ovisi o površini sliva  $R_A$  te se definira izrazom:

$$Q_S = R_A \cdot (Q_{MS} + Q_{CS}) \quad (46)$$

Prije pokretanja modela, nužno je definirati periode warm-up-a, kalibracije te validacije, ključnih faza u razvoju i evaluaciji modela. Warm-up period predstavlja vremenski interval nakon kojeg se početna pristranost modela smatra zanemarivom, a rezultati simulacije iz tog perioda ne uzimaju se u obzir u fazi kalibracije (Mazzilli i ostali, 2019). Razdoblje kalibracije obuhvaća vremenski interval u kojem se performanse modela koriste za odabir optimalnog skupa parametara, dok razdoblje validacije predstavlja vremenski interval u kojem se procjenjuje izvedba modela (Mazzilli i ostali, 2019). Model je kalibriran korištenjem kvazi Monte-Carlo postupka, uz Sobol sekvencu uzorkovanja parametara (Mazzilli i ostali, 2019; Sivelse i ostali, 2019). Kalibracija se zaustavlja kada se prikupe svi skupovi parametara koji zadovoljavaju kriterij višeciljne funkcije  $WOBJ > WOBJ_{\min}$  ili kada proteklo vrijeme simulacije dosegne maksimalno trajanje simulacije  $t_{\max}$  definirano od strane korisnika (Jourde i ostali, 2015; Mazzilli i ostali, 2019). Učinkovitost modela moguće je testirati korištenjem Nash-Sutcliffe koeficijenta učinkovitosti  $NSE$  (eng. Nash-Sutcliffe efficiency coefficient), volumetrijske učinkovitosti  $VE$  (eng. Volumetric Efficiency), modificirane pogreške ravnoteže  $BE$  (eng. modified Balance Error) te Kling Gupta učinkovitosti  $KGE$  (eng. Kling Gupta efficiency).

Pri izradi modela izvora Opačac, za warm-up period korišteno je razdoblje od 1. siječnja 1995. do 31. prosinca 1999. godine, za period kalibracije od 1. siječnja 2000. godine do 31. prosinca 2009. godine, dok je za razdoblje validacije uzet period od 1. siječnja 2010. godine do 31. prosinca 2021. godine.

Učinkovitost modela testirana je višeciljnom funkcijom  $WOBJ$  definiranom kao ponderirani zbroj dvaju kriterija izvedbe (Sivelse i ostali, 2019):

$$WOBJ = 0,9 \cdot NSE + 0,1 \cdot BE \quad (47)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum (Q_S - Q_{OBS})^2}{\sum (Q_S - \overline{Q_{OBS}})^2} \quad (48)$$

$$BE = 1 - \frac{\sum (Q_S - Q_{OBS})}{\sum Q_{OBS}} \quad (49)$$

gdje  $Q_S$  predstavlja simulirani protok, a  $Q_{OBS}$  mjereni protok. Za minimalnu vrijednost ciljne funkcije  $WOB_{min}$  odabrana je vrijednost 0.75. Oba koeficijenta, NSE i BE, poprimaju vrijednosti od  $-\infty$  do 1, pri čemu više vrijednosti ukazuju na bolje podudaranje modela s mjerenim vrijednostima.

Parametri modela, raspon vrijednosti za optimizaciju parametara te konačne vrijednosti parametara dobivenih kalibracijom prikazani su u Tablici 5.1. Kalibrirane vrijednosti parametara su konačne vrijednosti parametara koje se koriste za izračun rezultirajućeg hidrograma modela.

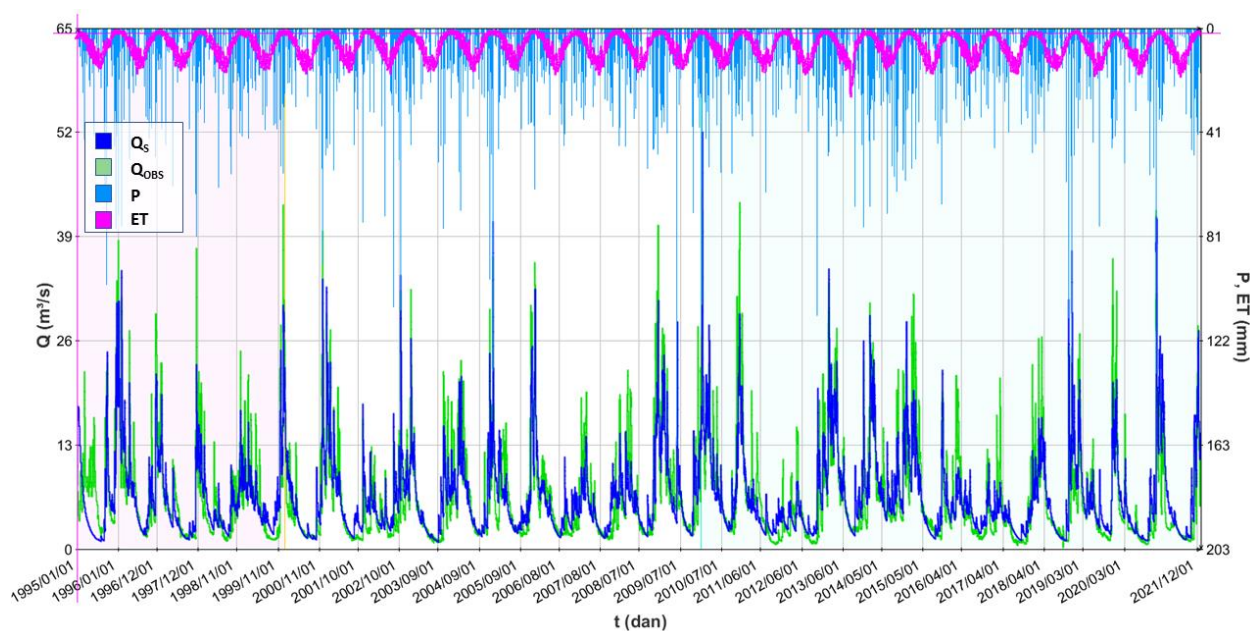
**Tablica 5.1** Parametri modela, zajedno s rasponima njihovih vrijednosti i optimalnim kalibriranim vrijednostima parametara

| Parametar     | Objašnjenje                       | Raspon          | Kalibrirana vrijednost |
|---------------|-----------------------------------|-----------------|------------------------|
| $R_A$         | površina sliva                    | 200 – 250       | 234                    |
| $E_0$         | razina u rezervoaru E             | 200 – 400       | 312                    |
| $k_{EM}$      | spec. koeficijent otjecanja E → M | $10^{-4}$ – 3   | $1.37 \cdot 10^{-4}$   |
| $k_{EC}$      | spec. koeficijent otjecanja E → C | $10^{-4}$ – 1   | 0,301                  |
| $\alpha_{EC}$ | eksponent E → C                   | 2 – 4           | 3,63                   |
| $C_0$         | razina u rezervoaru C             | 0 – 100         | 83                     |
| $k_{CS}$      | spec. koeficijent otjecanja C → S | $10^{-4}$ – 0.5 | $1,99 \cdot 10^{-4}$   |
| $\alpha_{CS}$ | eksponent C → S                   | 1.5 – 3         | 2,04                   |
| $M_0$         | razina u rezervoaru M             | 200 – 400       | 388                    |
| $k_{MS}$      | spec. koeficijent otjecanja M → S | $10^{-4}$ – 0.5 | $1,14 \cdot 10^{-4}$   |
| $k_{MC}$      | spec. koeficijent otjecanja M → C | $10^{-4}$ – 1   | 0,076                  |

Korištenjem optimalnih vrijednosti parametara izračunate su simulirane vrijednosti protoka na izvoru Opačac. Zajedno s izmjerenim protocima, ulaznim podacima oborina i referentne evapotranspiracije, prikazani su na slici 5.3. Vrijednost višeciljne funkcije zadovoljava kriterij da je  $WOBJ > WOBJ_{min}$ , iz čega se može zaključiti da model veoma dobro opisuje stvarne vrijednosti protoka na Opačcu. Vrijednosti učinkovitosti modela prikazane su u tablici 5.2.

**Tablica 5.2** Vrijednosti višeciljne funkcije WOBJ i parametara učinkovitosti modela NSE i BE za periode kalibracije i validacije modela

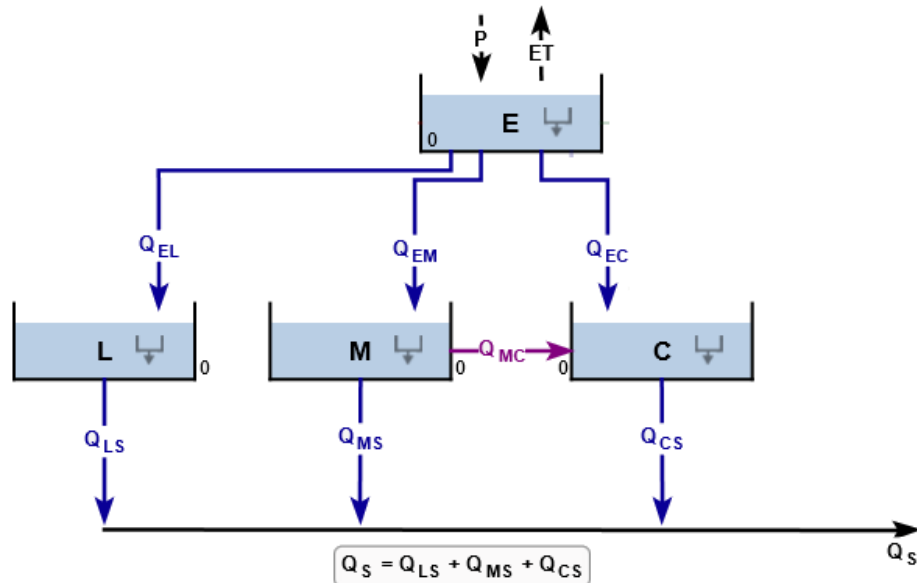
|                           |      |      |
|---------------------------|------|------|
|                           | WOBJ | 0,77 |
| <b>Kalibracija modela</b> | NSE  | 0,74 |
|                           | BE   | 0,98 |
|                           | WOBJ | 0,78 |
| <b>Validacija modela</b>  | NSE  | 0,76 |
|                           | BE   | 0,96 |



**Slika 5.3** Usporedba hidrograma mjenjenih vrijednosti protoka ( $Q_{OBS}$ ) i simuliranih vrijednosti protoka ( $Q_S$ ) na izvoru Opačac uz prikaz vremenske serije ulaznih podataka oborina i referentne evapotranspiracije

Uz model izvora Opačac, koji se sastoji od tri odjeljka za simulaciju epikrške zone, matrice i provodnika, razvijen je i model izvora s četiri odjeljka. Tri odjeljka zadržavaju iste funkcije kao u prethodnom modelu, dok četvrti odjeljak simulira Crveno jezero, uzimajući u obzir pretpostavljenu povezanost izvora s jezerom iznesenu u ovom istraživanju.

Model s Crvenim jezerom izrađen je za isti period promatranja te s istim definiranim razdobljima warm-up-a, kalibracije i validacije. Struktura modela prikazana je na slici 5.4.



**Slika 5.4** Struktura modela izvora Opačac s odjeljkom L koje simulira Crveno jezero

Uz već definirane vremenske promjene razine vode u odjeljcima E, M i C u izrazima, promjena razine vode u odjeljku L definira se kao

$$\frac{dL}{dt} = Q_{EL} - Q_{LS} \quad (50)$$

Dok je veličina protoka na izvoru  $Q_S$  jednaka:

$$Q_S = R_A \cdot (Q_{LS} + Q_{MS} + Q_{CS}) \quad (51)$$

Parametri modela, raspon vrijednosti za optimizaciju parametara te konačne vrijednosti parametara dobivenih kalibracijom prikazani su u Tablici 5.3.

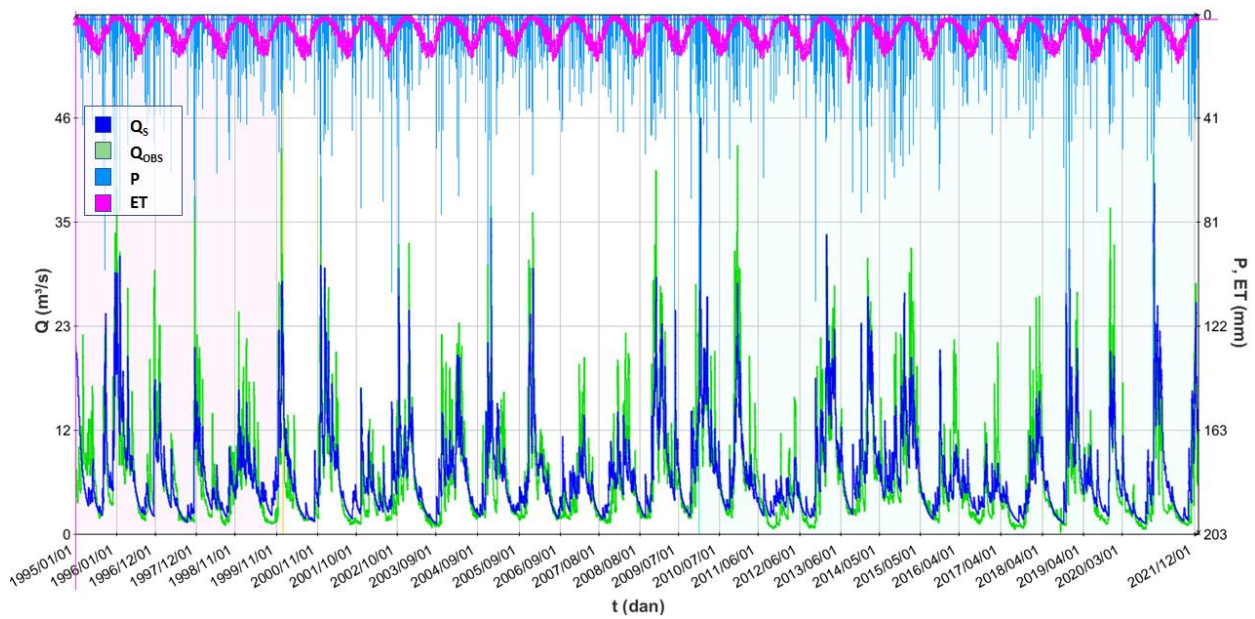
**Tablica 5.3** Parametri modela, zajedno s rasponima njihovih vrijednosti i optimalnim kalibriranim vrijednostima parametara za model izvora Opačac te Crvenog jezera

| Parametar     | Objašnjenje                       | Raspon           | Kalibrirana vrijednost |
|---------------|-----------------------------------|------------------|------------------------|
| $R_A$         | površina sliva                    | 200 – 300        | 245                    |
| $E_0$         | razina u rezervoaru E             | 0 – 500          | 95,9                   |
| $k_{EM}$      | spec. koeficijent otjecanja E → M | $10^{-4} - 1$    | $3,17 \cdot 10^{-4}$   |
| $k_{EC}$      | spec. koeficijent otjecanja E → C | $10^{-4} - 1$    | 0,065                  |
| $\alpha_{EC}$ | eksponent E → C                   | 3 – 4            | 3,85                   |
| $C_0$         | razina u rezervoaru C             | 0 – 300          | 8,58                   |
| $k_{CS}$      | spec. koeficijent otjecanja C → S | $10^{-4} - 10$   | $2,24 \cdot 10^{-4}$   |
| $\alpha_{CS}$ | eksponent C → S                   | 1.5 – 2          | 1,95                   |
| $M_0$         | razina u rezervoaru M             | 0 – 500          | 370                    |
| $k_{MS}$      | spec. koeficijent otjecanja M → S | $10^{-4} - 1$    | $1,1 \cdot 10^{-4}$    |
| $k_{MC}$      | spec. koeficijent otjecanja M → C | $10^{-4} - 1$    | 0,046                  |
| $L_0$         | razina u rezervoaru L             | 0 – 200          | 174                    |
| $k_{LS}$      | spec. koeficijent otjecanja L → S | 0,008 – 0,11     | 0,044                  |
| $k_{EL}$      | spec. koeficijent otjecanja E → L | $10^{-4} - 0,01$ | 0,003                  |

Korištenjem optimalnih vrijednosti parametara izračunate su simulirane vrijednosti protoka na Opačcu za model s Crvenim jezerom. Zajedno s izmjerenim protocima na Opačcu, ulaznim podacima oborina i referentne evapotranspiracije, prikazani su na slici 5.5. Vrijednost višeciljne funkcije zadovoljava kriterij da je  $WOBJ > WOBJ_{\min}$  ( $WOBJ_{\min} = 0,75$ ), iz čega se može zaključiti da model veoma dobro opisuje stvarne vrijednosti protoka na Opačcu. Vrijednosti učinkovitosti modela prikazane su u tablici 5.4.

**Tablica 5.4** Vrijednosti višeciljne funkcije WOBJ i parametara učinkovitosti modela NSE i BE za periode kalibracije i validacije modela s Crvenim jezerom

|                           |      |      |
|---------------------------|------|------|
|                           | WOBJ | 0,76 |
| <b>Kalibracija modela</b> | NSE  | 0,73 |
|                           | BE   | 0,96 |
|                           | WOBJ | 0,78 |
| <b>Validacija modela</b>  | NSE  | 0,76 |
|                           | BE   | 0,94 |

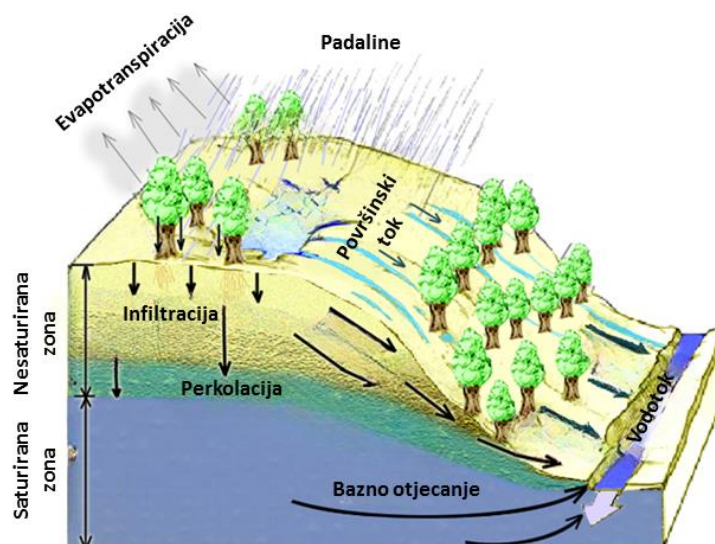


**Slika 5.5** Usporedba hidrograma mjerenih vrijednosti protoka ( $Q_{OBS}$ ) i simuliranih vrijednosti protoka ( $Q_S$ ) na izvoru Opačac za model s Crvenim jezerom, uz prikaz vremenske serije ulaznih podataka oborina i referentne evapotranspiracije



## 5.2. Izrada modela u MIKE SHE-u

Pri izradi hidrološkog modela šireg područja Imotskog polja modelirani su hidrološki procesi kanalnog toka u vodotocima, površinskog toka te toka u nesaturiranoj i saturiranoj zoni (Slika 5.6).



**Slika 5.6** Modelirani hidrološki procesi u MIKE SHE-u (modificirano prema Tarboton (2003))

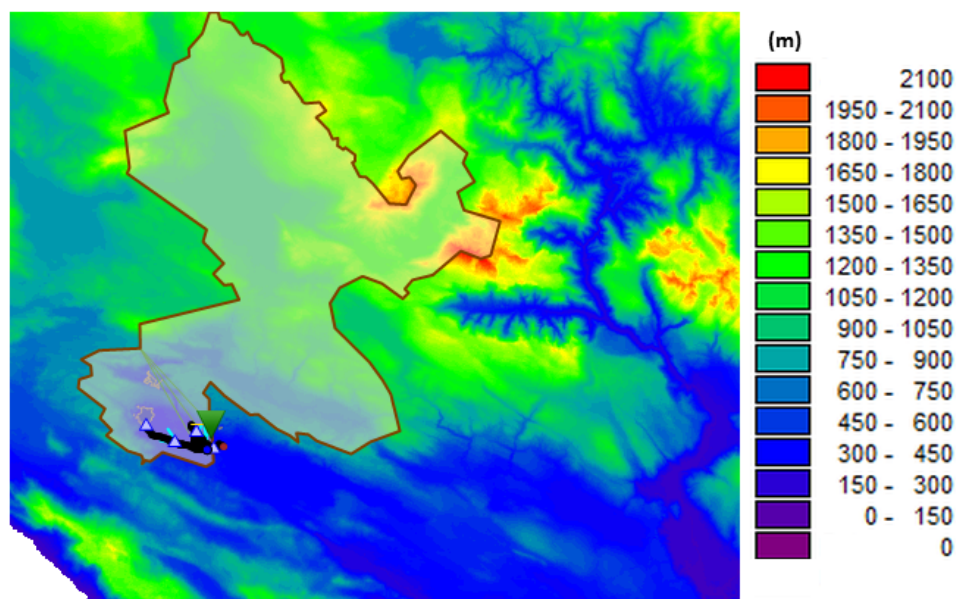
Model je koncipiran na način da simulira hidrološke procese u vodotocima u Imotskom polju, a krajnji rezultat modela je simulacija protoka na postaji Kamenmost. Vodotoci koji su uključeni u simulaciju su Vrljika kao glavni tok, Sija kao manji pritok te Opačac - Glavni natapni kanal kao regulirani kanal za navodnjavanje jugoistočnog dijela polja (Slika 5.7). Iako je utjecaj Sije i Glavnog natapnog kanala zanemariv u odnosu na ukupni protok Opačca, isti su uzeti u obzir pri modeliranju kako bi simulacija toka bila preciznija. S obzirom na pretpostavljenu vezu Opačca s Crvenim jezerom iznesenu u ovom radu, modeliran je i utjecaj Crvenog jezera na formiranje protoka na Opačcu. Model je podijeljen na dva funkcionalna dijela, dio koji simulira jednodimenzionalni tok u vodotocima koristeći MIKE HYDRO, te dio koji simulira ostale hidrološke procese temeljem različitih ulaznih podataka koristeći MIKE SHE.



**Slika 5.7** Prikaz konceptualnog modela s lokacijama postaja uzetih u obzir pri modeliranju (podloga: Google Satellite)

Domenu modela čine granice topografskog sliva određenog delineacijom sliva, procesom identifikacije i kartiranja granica sliva temeljem digitalnog modela terena. Površina sliva odgovornog za direktno otjecanje, koja uključuje i viša uzvodna polja, dobivena procesom delineacije, je 1050 km<sup>2</sup>. U istraživanju je korišten digitalni model terena (DEM) s platforme Copernicus prostorne rezolucije 25 metara, temeljem kojeg je izrađena i topografija terena. Delineacija sliva izvršena je korištenjem programa QGIS.

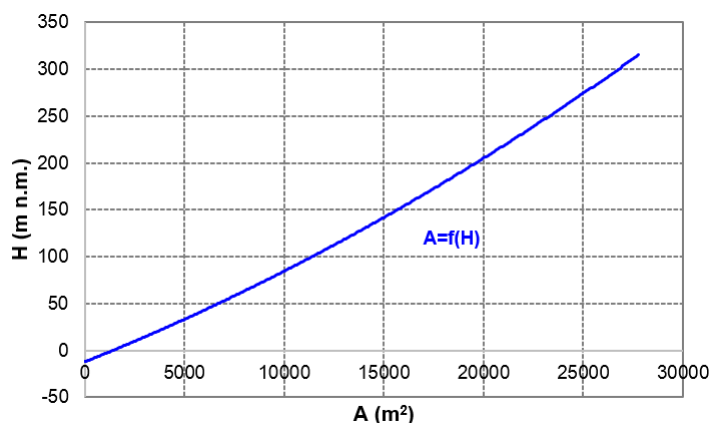
Glavni ulazni podaci modela, uz definiran sliv, topografiju i domenu modela (Slika 5.8), su količina oborina s meteorološke postaje Imotski te referentna evapotranspiracija izračunata prema Hargreavesovoj metodi. Model je kalibriran na periodu od 29. rujna 2013. godine do 29. rujna 2016. godine i testiran na podacima od 30. rujna 2016. godine do 20. ožujka 2019. godine. Odabrani periodi u skladu su s dostupnošću podataka u Crvenom jezeru.



*Slika 5.8* Prikaz topografije terena, uz definiran sliv te domenu modela i simulirane vodotoke

#### *Tok u vodotocima*

Jednodimenzionalni tok u vodotocima simuliran je pomoću MIKE HYDRO modela. Uz prethodno navedene ulazne podatke, definirani su i podaci o poprečnim presjecima korita na lokacijama hidroloških postaja: Proložac – Natapni kanal, Šumet - Sija, Opačac, Opačac – Natapni kanal te Kamenmost, sukladno podacima DHMZ-a. Crveno jezero modelirano je kao spremnik povezan s gornjim tokom Vrljike, odnosno Opačcem (Slika 5.7). Kapacitet spremnika je prikazan krivuljom nadmorske visine i površine jezera (Slika 5.9), temeljenom na postojećim podacima o promjenama zapremnine jezera u funkciji razine vode (Andrić i ostali, 2013, 2017). Za rubne uvjete postavljeni su vremenski promjenjivi vodostaji na sljedećim lokacijama: Proložac-Natapni kanal kao početak toka Sije, kraj Glavnog natapnog kanala i postaja Kamenmost. Početni uvjeti na lokacijama hidroloških postaja jednaki su izmjerenim vodostajima na dan početka kalibracije podataka.



Slika 5.9 Krivulja promjene površine jezera u funkciji razine vode

Rezultat MIKE HYDRO modela je simulirani protok na postaji Kamenmost. Simulacija protoka izvršena je primjenom NAM rainfall-runoff modela. NAM (Nedbør-Afstrømnings Model) je konceptualni, deterministički i objedinjeni model razvijen od strane DHI za simulaciju hidrologije površinskog sliva (DHI Water & Environment, 2024). Simulira proces krškog otjecanja kontinuiranim računanjem sadržaja vode u četiri različita i međusobno povezana spremnika koji predstavljaju fizičke karakteristike sliva. Struktura modela sastoji se od spremnika snijega koji predstavlja akumulaciju snijega na površini tla, površinskog spremnika koji predstavlja vodu nakupljenu na površini tla nakon oborina, spremnika gornjih slojeva tla koji predstavlja vodu infiltriranu u tlo koja još nije dosegla razinu podzemnih voda, te podzemnog spremnika koji predstavlja vodu infiltriranu do razine podzemnih voda (DHI Water & Environment, 2024). Funkcioniranje svakog spremnika opisuje se s određenim brojem parametara. Vrijednosti parametara definiraju se unutar zadanih raspona, a proces optimizacije parametara proveden je postupkom autokalibracije. Parametri koji su uključeni u proces autokalibracije su (DHI Water & Environment, 2024):

- $U_{\max}$  = maksimalni sadržaj vode u površinskom spremniku,
- $L_{\max}$  = maksimalan sadržaj vode u spremniku gornjih slojeva tla,
- CQOF = koeficijent površinskog otjecanja,
- CKIF = vremenska konstanta lateralnog toka u nesaturiranoj zoni,
- $CK_{1,2}$  = vremenska konstanta usmjeravanja površinskog toka,
- TOF = granična vrijednost površinskog toka,
- TIF = granična vrijednost lateralnog toka u nesaturiranoj zoni,
- TG = granična vrijednost podzemnog toka,
- $CK_{BF}$  = vremenska konstanta usmjeravanja baznog toka,
- $CQ_{Low}$  = protok prema donjem spremniku podzemnih voda i
- $CK_{Low}$  = vremenska konstanta za usmjeravanje donjeg baznog toka.

Rasponi vrijednosti parametara modela te usvojene kalibrirane vrijednosti parametara prikazane su u Tablici 5.5.

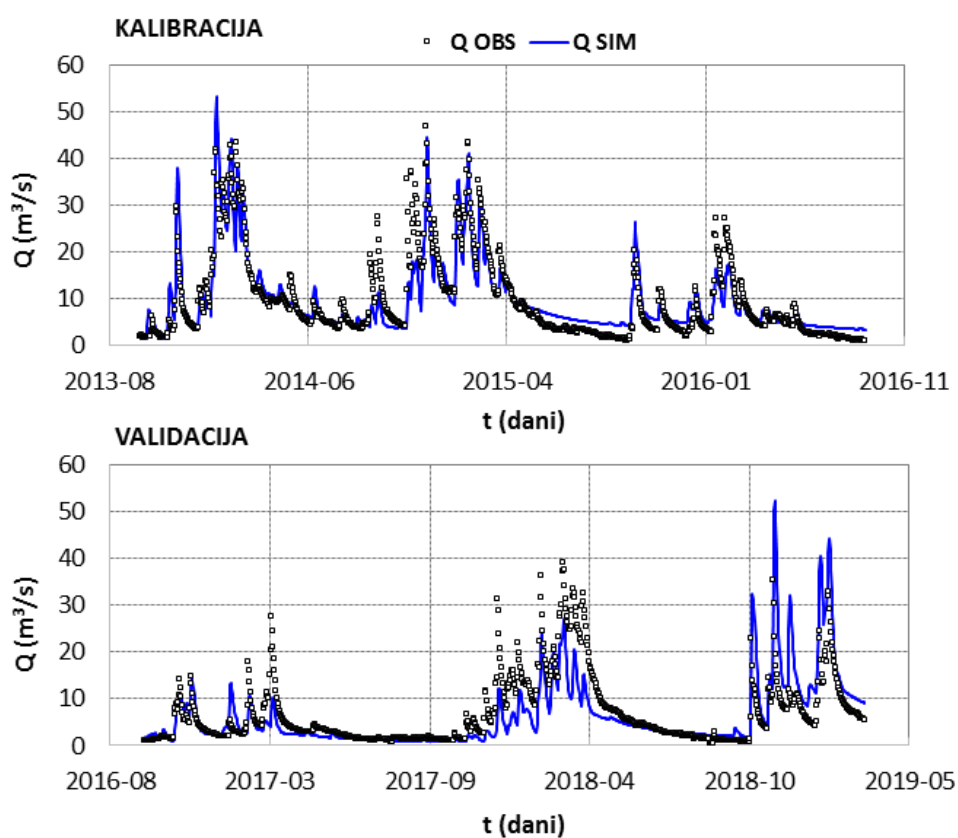
**Tablica 5.5** Rasponi parametara modela te kalibrirane vrijednosti parametara modela

| <b>Parametar</b> | <b>Raspon</b> | <b>Kalibrirana vrijednost</b> |
|------------------|---------------|-------------------------------|
| $U_{\max}$       | 10 – 20       | 16,988                        |
| $L_{\max}$       | 10 – 300      | 298,692                       |
| CQOF             | 0,2 – 1       | 0,2                           |
| CKIF             | 100 – 1000    | 802,314                       |
| $CK_{1,2}$       | 10 – 50       | 50                            |
| TOF              | 0 – 0,99      | 0                             |
| TIF              | 0 – 0,99      | 0                             |
| TG               | 0 – 0,99      | 0,145                         |
| $CK_{BF}$        | 1000 – 4000   | 1749,251                      |
| $CQ_{Low}$       | 0 – 100       | 62,564                        |
| $CK_{Low}$       | 1000 – 30000  | 21541,101                     |

Učinkovitost kalibriranog te validiranog modela testirana je koeficijentom determinacije ( $R^2$ ), Nash-Sutcliffeovim koeficijentom učinkovitosti (NSE) te modificiranom pogreškom ravnoteže (BE). Analiza statističkih indeksa učinkovitosti pokazala je da kalibrirani model vrlo dobro simulira stvarne tokove u vodotocima (Tablica 5.6). Ipak, primjena usvojenih kalibriranih parametara na razdoblju od 30. rujna 2016. godine do 20. ožujka 2019. rezultirala je manjim vrijednostima statističkih indeksa kao posljedica izražajnijih razlika u vršnim vrijednostima protoka. Unatoč ovim razlikama, model jednodimenzionalnog toka pokazao je zadovoljavajuću razinu preciznosti (Slika 5.10), koja je uz modeliranje ostalih hidroloških procesa u vodonosniku pridonijela učinkovitosti integriranog modela u MIKE SHE-u.

**Tablica 5.6** Vrijednosti parametara učinkovitosti modela  $R^2$ , NSE i BE za kalibrirani i validirani model jednodimenzionalnog toka u vodotocima

|                           |       |      |
|---------------------------|-------|------|
|                           | $R^2$ | 0,84 |
| <b>Kalibracija modela</b> | NSE   | 0,80 |
|                           | BE    | 0,74 |
|                           | $R^2$ | 0,55 |
| <b>Validacija modela</b>  | NSE   | 0,50 |
|                           | BE    | 0,40 |



**Slika 5.10** Mjereni ( $Q_{OBS}$ ) i simulirani protoci ( $Q_S$ ) na postaji Kamenmost za periode kalibracije i validacije modela jednodimenzionalnog toka u vodotocima



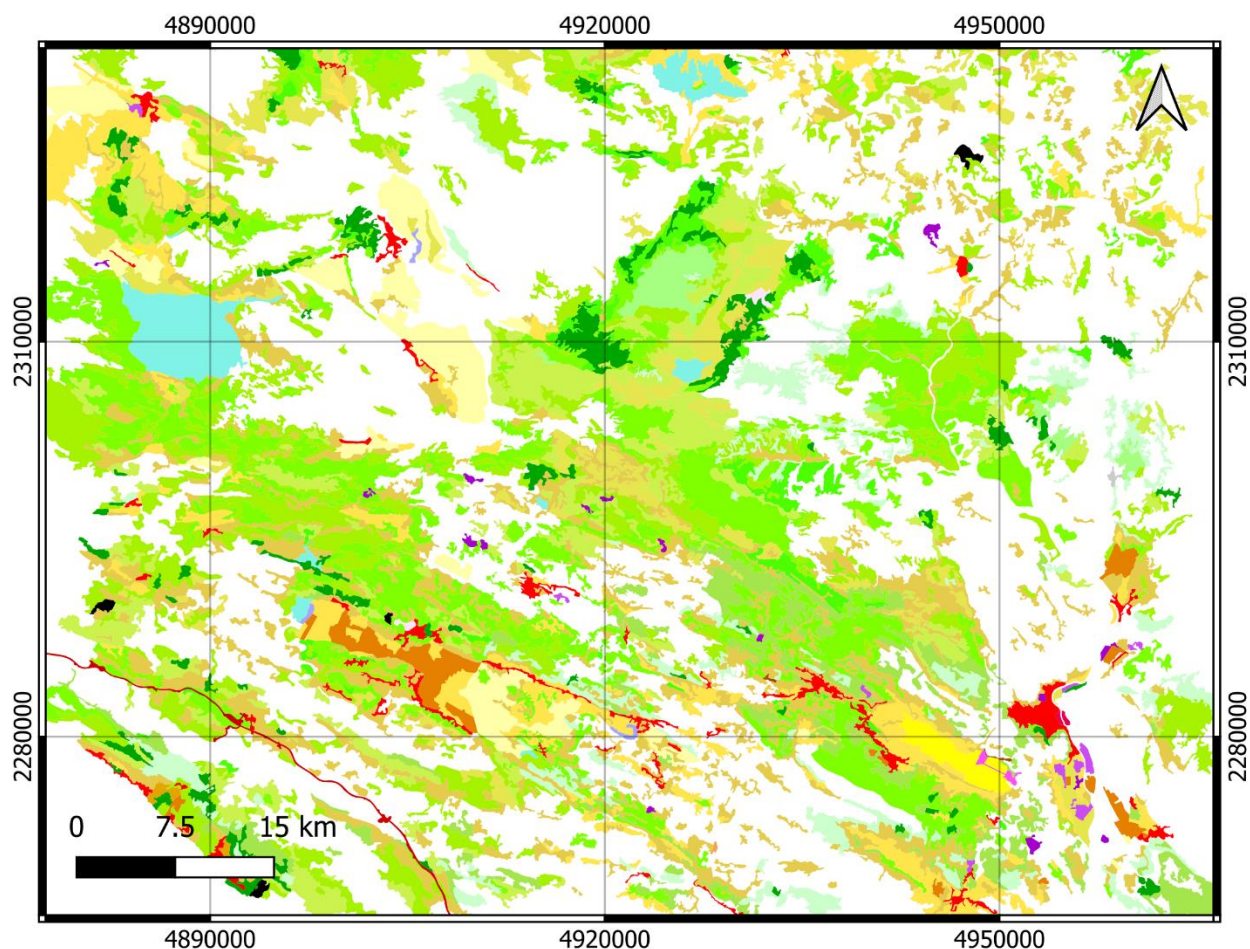
### *Površinski tok*

Površinski tok je proces otjecanja vode koji nastaje kad količina oborina premaši infiltracijski kapacitet tla. Simuliran je pomoću metode konačnih razlika (*eng. Finite Difference Method*), numeričke metode za aproksimaciju rješenja diferencijalnih jednadžbi koje se koriste za modeliranje različitih hidroloških procesa, uključujući i površinski tok (DHI Water & Environment, 2017). Ulazni podaci za simuliranje toka su Manningov broj, veličina spremnika za zadržavanje vode (*eng. Detention storage*) te početna dubina vode na površini.

U MIKE SHE, Manningov broj (označen kao  $M$ ) odgovara Sticklerovom koeficijentu  $K_s$  i recipročan je standardnom Manningovom broju  $n$ . S obzirom na nedostatak dostupnih podataka o vrijednostima Manningovog broja za vodotoke u razmatranju, izabrana je konstantna vrijednost Manningovog broja ( $M$ ) od  $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  (Chow, 1959). Tijekom procesa kalibracije modela, ova vrijednost je pokazala i optimalnije rezultate. Još jedan parametar koji utječe na površinski tok je veličina spremnika za zadržavanje vode koji kontrolira količinu skladištenja na samoj površini. U modelu je za ovaj parametar te za početnu dubinu vode na površini postavljena vrijednost od 0 mm. Navedene vrijednosti odražavaju karakteristike krša s vrlo ograničenom sposobnošću zadržavanja vode na površini. Umjesto toga, visok utjecaj procesa infiltracije i perkolacije, koji uz izrazitu okršenost terena, dovodi do brzog poniranja vode s površine prema dubljim slojevima (Bonacci, 1987).

### *Nesaturarni tok*

Nesaturirani tok modelira se dvoslojnom metodom vodne ravnoteže (*eng. 2-Layer Water Balance Method*). Metoda dijeli nesaturiranu zonu na dva sloja - gornji površinski sloj te donji dublji sloj tla, a svojstva tla definiraju se parametrima. Primjena navedene metode omogućava izračun stvarne evapotranspiracije te količinu vode koja opskrbljuje nesaturiranu zonu (DHI Water & Environment, 2024). Vegetacija je uzeta u obzir parametrima indeksa lisne površine ( $LAI$ ) i dubine korijena ( $RD$ ). Indeks lisne površine je bezdimenzionalan parametar koji označava ukupnu površinu lišća po jedinici površine tla (Parker, 2020). Parametri  $LAI$  i  $RD$  definirani su za svaku klasu zemljišnog pokrova. Podaci o pokrovu i namjeni zemljišta korišteni su sa digitalne baze podataka o stanju i promjenama zemljišnog pokrova Corine Land Cover 2018 (Slika 5.11).



**Namjena zemljišta**

- Cjelovita gradska područja
- Nepovezana gradska područja
- Industrijski ili komercijalni objekti
- Cestovne i željezničke mreže
- Mjesta eksploatacije mineralnih sirovina
- Odlagališta otpada
- Gradilišta
- Športsko rekreacijske površine
- Nenavodnjavano obradive površine
- Navodnjavane oranice
- Vinogradi
- Voćnjaci
- Maslinici
- Pašnjaci

- Mozaik poljoprivrednih površina
- Pretežno poljoprivredno zemljište
- Bjelogorične šume
- Crnogorične šume
- Mješovite šume
- Prirodni travnjaci
- Kontinentalna grmolika vegetacija
- Mediteranske grmolike vegetacije
- Sukcesija šume (zemljišta u zarastanju)
- Gole stijene
- Područja s oskudnom vegetacijom
- Opožarena područja
- Kopnene močvare
- Vodna tijela
- Nema podataka

*Slika 5.11* Podaci o pokrovu i namjeni zemljišta prema Corine Land Cover 2018



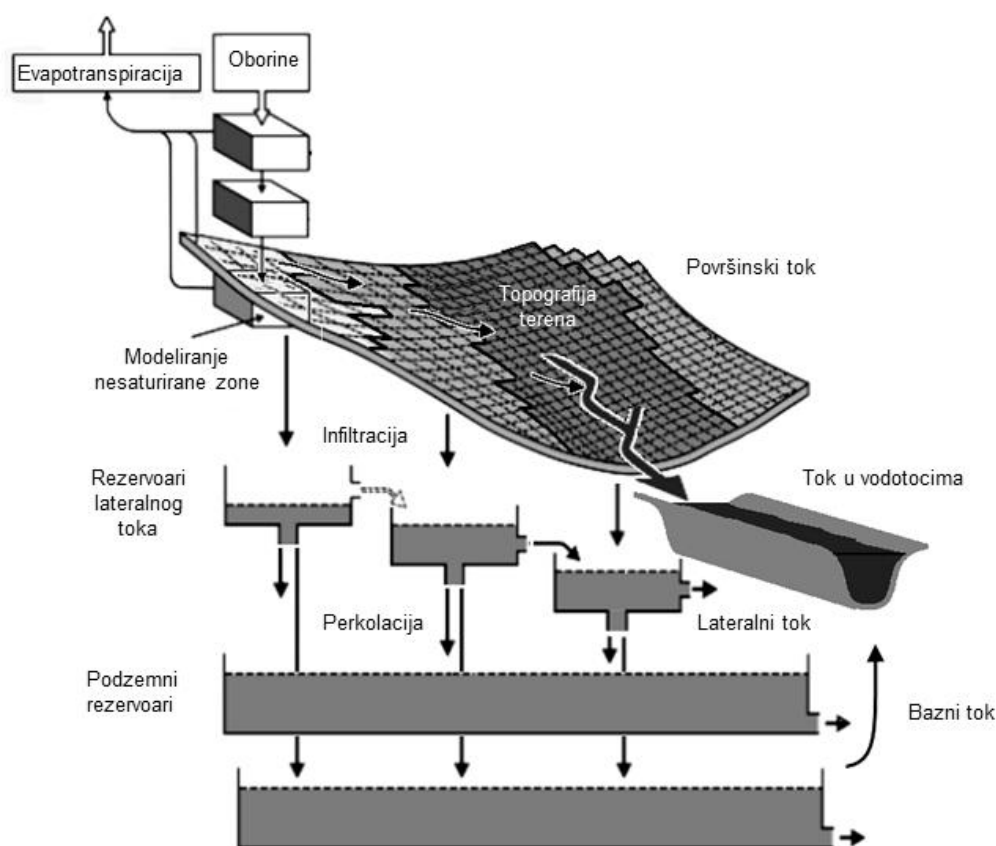
Pri modeliranju nesaturiranog toka, nužno je definirati karakteristike tla koje se određuju parametrima kao što su sadržaj vode pri zasićenju, sadržaj vode pri poljskom kapacitetu, sadržaj vode pri točki venuća i zasićena hidraulička provodljivost. Kalibracija navedenih parametara provedena je metodom pokušaja i pogreške, a vrijednosti parametara prikazani su u tablici 5.7.

**Tablica 5.7** Pregled parametara i kalibriranih vrijednosti parametara za modeliranje nesaturiranog toka

| Parametar                            | Kalibrirana vrijednost |
|--------------------------------------|------------------------|
| Sadržaj vode pri zasićenju           | 0,9                    |
| Sadržaj vode pri poljskom kapacitetu | 0,8                    |
| Sadržaj vode pri točki venuća        | 0,05                   |
| Zasićena hidraulička provodljivost   | $10^{-5}$              |

#### *Saturirani tok*

Saturirani tok modelira se primjenom metode linearnog rezervoara. Primjena ove metode pri simuliranju saturiranog toka predstavlja kompromis između ograničene dostupnosti podataka, složenosti hidrološkog odgovora sustava te prednosti koje donosi jednostavnost modela (DHI Water & Environment, 2017). Metodom linearnog rezervoara saturirana zona se dijeli na nekoliko međusobno povezanih plićih rezervoara lateralnog toka, te nekoliko odvojenih dubljih podzemnih rezervoara koji sudjeluju u formiranju baznog toka (Slika 5.12). Voda tako iz nesaturirane zone procesima infiltracije i perkolacije može pridonijeti formiranju lateralnog ili baznog toka. Pri modeliranju baznog toka najčešće se koristi jedan rezervoar, međutim pri modeliranju većih slivova moguća je primjena i više podzemnih rezervoara. Neovisno o broju podzemnih rezervoara, svaki podzemni rezervoar je dalje podijeljen na dva paralelna rezervoara koji se mogu koristiti za modeliranje brzih i sporih komponenti baznog otjecanja (DHI Water & Environment, 2017).



**Slika 5.12** Struktura modela s primjenom metode linearnog rezervoara (modificirano prema *Graham & Butts (2005)*)

Karakteristike rezervoara lateralnog toka te podzemnih rezervoara definirane su odgovarajućim parametrima prikazanim u tablicama 5.8 i 5.9. Kalibracija parametara provedena je metodom pokušaja i pogreške.

**Tablica 5.8** Pregled parametara i kalibriranih vrijednosti parametara za modeliranje lateralnog toka

| Parametar                           | Kalibrirana vrijednost |
|-------------------------------------|------------------------|
| Specifična izdašnost                | 0,1                    |
| Početna dubina vode u rezervoaru    | 4                      |
| Dubina dna rezervoara               | 4                      |
| Vremenska konstanta lateralnog toka | 12                     |
| Granična dubina lateralnog toka     | 1                      |
| Vremenska konstanta perkolacije     | 21                     |

**Tablica 5.9** Pregled parametara i kalibriranih vrijednosti parametara za modeliranje baznog toka

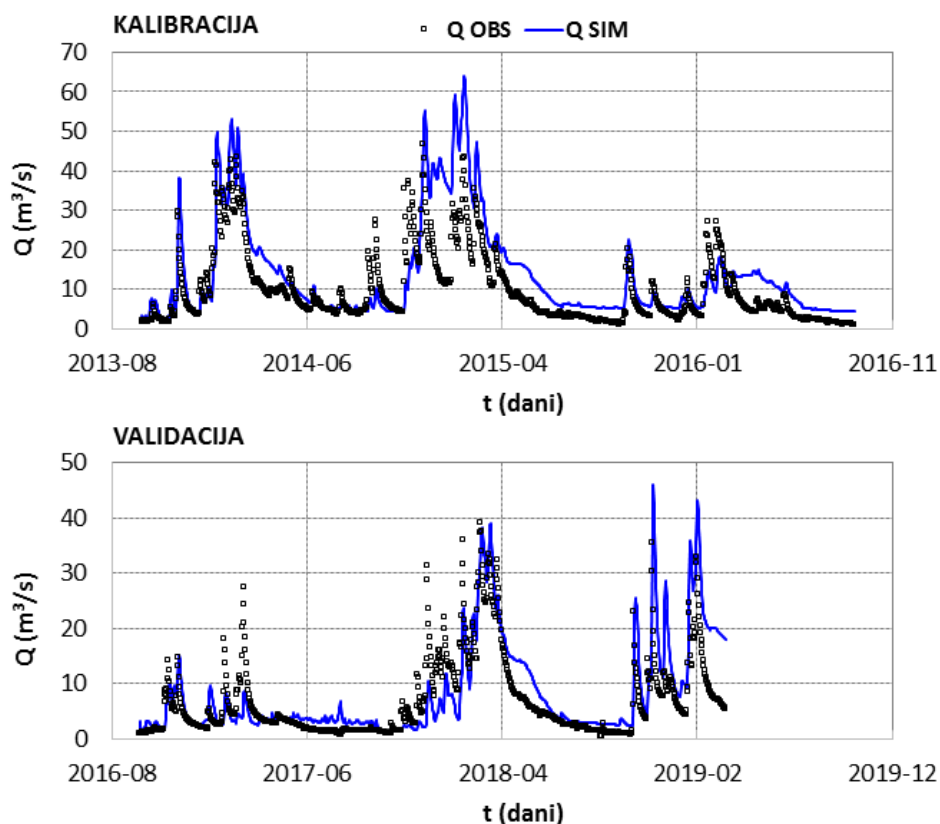
|             | <b>Parametar</b>                            | <b>Kalibrirana vrijednost</b> |
|-------------|---|-------------------------------|
| Rezervoar 1 | Specifična izdašnost                        | 0,2                           |
|             | Vremenska konstanta baznog toka             | 25                            |
|             | Mrtvi volumen                               | 0                             |
|             | Postotak povratka vode iz nesaturirane zone | 0,3                           |
|             | Početna dubina vode u rezervoaru            | 20                            |
|             | Granična dubina baznog toka                 | 20                            |
|             | Granična dubina pumpanja iz rezervoara      | 20                            |
|             | Dubina do dna rezervoara                    | 20                            |
| Rezervoar 2 | Specifična izdašnost                        | 0,9                           |
|             | Vremenska konstanta baznog toka             | 6000                          |
|             | Mrtvi volumen                               | 0                             |
|             | Postotak povratka vode iz nesaturirane zone | 0,1                           |
|             | Početna dubina vode u rezervoaru            | 50                            |
|             | Granična dubina baznog toka                 | 50                            |
|             | Granična dubina pumpanja iz rezervoara      | 50                            |
|             | Dubina do dna rezervoara                    | 50                            |

### Rezultati

Kalibracija modela izvršena je s prethodno definiranim parametrima na periodu od 29. rujna 2013. godine do 29. rujna 2016. godine. Izlaz iz modela predstavlja simulirani dnevni protok na postaji Kamenmost. Učinkovitost kalibriranog te validiranog modela testirana je koeficijentom determinacije ( $R^2$ ), Nash-Sutcliffeovim koeficijentom učinkovitosti (NSE) te modificiranom pogreškom ravnoteže (BE). Model je testiran na podacima od 30. rujna 2016. godine do 20. ožujka 2019. godine. Odabrani periodi u skladu su s dostupnošću podataka u Crvenom jezeru.

Parametri učinkovitosti pokazuju očekivano bolje poklapanje kalibriranog modela s mjerenim vrijednostima u usporedbi s validiranim modelom (Slika 5.13). S obzirom na vrijednosti koeficijenta determinacije i Nash-Sutcliffeovog koeficijenta učinkovitosti (Tablica 5.10), koje su veće od 0,5, može se zaključiti da integrirani model zadovoljavajuće simulira ponašanje stvarnog sustava (Santhi i ostali, 2001; Waseem i ostali, 2008). Ipak, usprkos velikog broja ulaznih podataka te većeg broja kalibriranih parametara u usporedbi s KARSTMOD modelom, integrirani model

ipak u potpunosti ne replicira ponašanje predmetnog vodonosnika. Najizraženija odstupanja, kao i kod modela jednodimenzionalnog toka u vodotocima su kod vršnih vrijednosti protoka.



**Slika 5.13** Mjereni ( $Q_{OBS}$ ) i simulirani protoci ( $Q_S$ ) na postaji Kamenmost za periode kalibracije i validacije integriranog modela u MIKE SHE-u

**Tablica 5.10** Vrijednosti parametara učinkovitosti modela  $R^2$ , NSE i BE za kalibrirani i validirani integrirani model u MIKE SHE-u

|                           |       |      |
|---------------------------|-------|------|
|                           | $R^2$ | 0,71 |
| <b>Kalibracija modela</b> | NSE   | 0,63 |
|                           | BE    | 0,44 |
|                           | $R^2$ | 0,64 |
| <b>Validacija modela</b>  | NSE   | 0,63 |
|                           | BE    | 0,5  |

### 5.3. Predviđanje protoka na izvoru Opačac u razdoblju od 2022. do 2060. godine

Predviđanje protoka na izvoru Opačac napravljeno je za razdoblje od 2022. do 2060. godine koristeći računalni model KARSTMOD. Pritom je simulacija napravljena na uspostavljenom modelu s četiri odjeljka za simulaciju hidrodinamike krškog sustava Opačca i Crvenog jezera opisanog u poglavlju 5.1.

Promatrani period simulacije protoka je od 1. siječnja 1995. godine do 31. prosinca 2060. godine. Ulazne varijable sustava su količina oborina koja je pala na sliv (P) te referentna evapotranspiracija (ET). Ulazni podaci strukturirani su na način da uključuju nizove mjerenih vrijednosti oborina i izračunate vrijednosti referentne evapotranspiracije, prema Hargreavesovoj metodi opisanoj u poglavlju Metodologija, temeljene na prosječnim minimalnim i maksimalnim dnevnim temperaturama za razdoblje od 1995. do zaključno sa 2021. godinom. Na ove nizove dodane su prognozirane vrijednosti oborina i referentne evapotranspiracije za razdoblje očekivanih klimatskih promjena. Vrijednosti oborina te prosječnih dnevnih minimalnih i maksimalnih temperatura zraka za razdoblje 2022.–2060. generirane su na temelju podataka iz razdoblja 1995.–2021., s prilagodbom srednjih vrijednosti i standardnih devijacija u skladu s klimatskim projekcijama za drugo razdoblje buduće klime (2041.–2070.).

Klimatske promjene koje se predviđaju na ovom području prema Državnom hidrometeorološkom zavodu i rezultatima RegCM-a za drugo razdoblje (2041.-2070.) buduće klime, a u odnosu na referentno razdoblje 1961.-1990. godine, uključuju porast temperature zraka i smanjenje količina oborina. Korekcija podataka izvršena je korištenjem izraza:

$$x_{kor} = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \cdot \sigma' + \bar{x}' \quad (52)$$

gdje su:

$x_{kor}$  – korigirana vrijednost varijable  $x$

$x_i$  –  $i$ -ta vrijednost varijable  $x$

$\bar{x}$  – srednja vrijednost promatranog niza podataka  $x_i$

$\sigma$  – standardna devijacija promatranog niza podataka

$\sigma'$  - korigirana vrijednost standardne devijacije

$\bar{x}'$  - srednja vrijednost korigiranog skupa podataka.

Varijabla  $x$  predstavlja varijablu od interesa, odnosno u ovom slučaju dnevnu količinu oborina ( $P$ ), prosječnu dnevnu minimalnu ( $T_{\min}$ ) ili maksimalnu ( $T_{\max}$ ) temperaturu zraka. Prognozirane vrijednosti promjene srednje vrijednosti i standardne devijacije oborina i temperature zraka dane su u Tablici 5.11.

**Tablica 5.11** Prognozirane vrijednosti promjene srednje vrijednosti i standardne varijacije oborina i temperatura zraka za drugo razdoblje buduće klime

|                          |                                    |  |
|--------------------------|------------------------------------|--|
| <b>Oborine</b>           | Srednja vrijednost <sup>1</sup>    | Zima: povećanje od 10%<br>Ostatak godine: smanjenje od 10% |
|                          | Standardna devijacija <sup>2</sup> | Povećanje od 5%  |
| <b>Temperatura zraka</b> | Srednja vrijednost <sup>1</sup>    | Minimalna: +2,2°C<br>Maksimalna: +2,0°C                    |
|                          | Standardna devijacija <sup>3</sup> | Povećanje od 5%  |

<sup>1</sup> Strategija prilagodbe klimatskim promjenama u Republici Hrvatskoj za razdoblje do 2040. godine s pogledom na 2070. godinu (2020); <sup>2</sup> Pendergrass i ostali (2017); <sup>3</sup> Branković i ostali (2009)

Simuliranje protoka na izvoru Opačac provedeno je za isti raspon vrijednosti parametara (Tablica 5.13) kao i kod već uspostavljenog modela za simulaciju hidrodinamike krškog sustava Opačca i Crvenog jezera opisanog u poglavlju 5.1. Za warm-up period korišteno je razdoblje od 1. siječnja 1995. do 31. prosinca 1999. godine, za period kalibracije od 1. siječnja 2000. godine do 31. prosinca 2021. godine, dok je za razdoblje validacije, odnosno u ovom slučaju simulacije budućeg protoka, uzet period od 1. siječnja 2022. godine do 31. prosinca 2060. godine.

Simulirani protoci, zajedno s izmjerenim protocima, ulaznim podacima oborina i referentne evapotranspiracije, prikazani su na slici 5.14. Vrijednost višeciljne funkcije zadovoljava kriterij da je  $WOBJ > WOBJ_{\min}$ , iz čega se može zaključiti da model veoma dobro opisuje stvarne vrijednosti protoka na Opačcu. Vrijednosti učinkovitosti modela prikazane su u tablici 5.12.

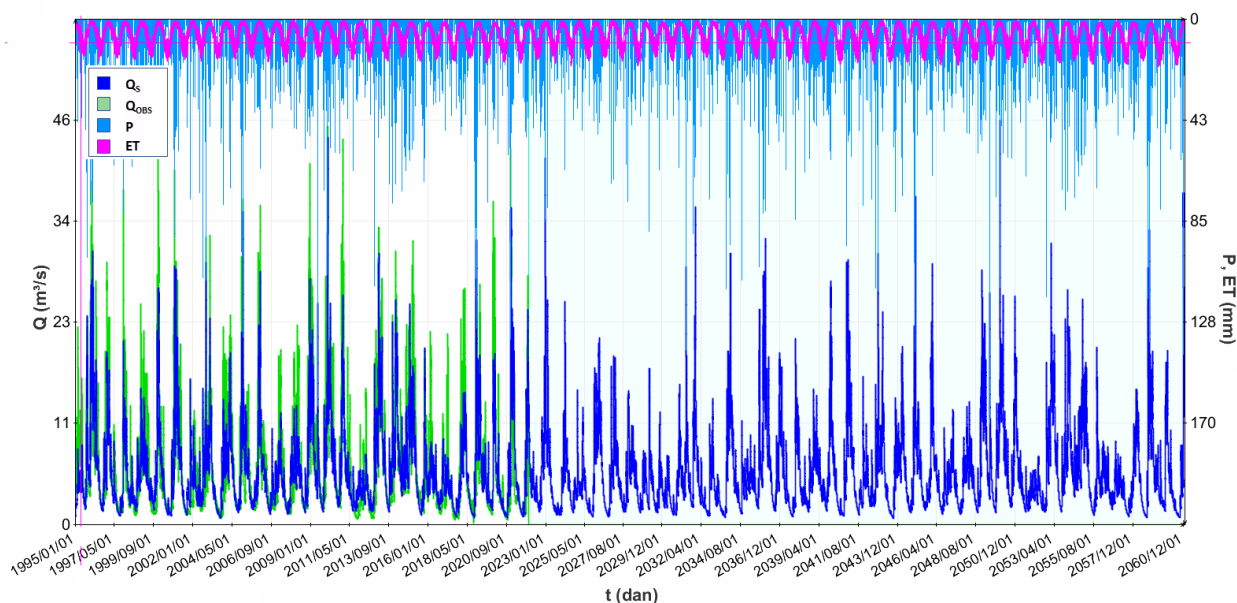
**Tablica 5.12** Vrijednosti višeciljne funkcije WOBJ i parametara učinkovitosti modela NSE i BE za period kalibracije

|                           |      |      |
|---------------------------|------|------|
|                           | WOBJ | 0,76 |
| <b>Kalibracija modela</b> | NSE  | 0,74 |
|                           | BE   | 0,94 |

**Tablica 5.13** Parametri modela, zajedno s rasponima njihovih vrijednosti i optimalnim kalibriranim vrijednostima parametara za model izvora Opačac te Crvenog jezera

| Parametar     | Objašnjenje                       | Raspon           | Kalibrirana vrijednost |
|---------------|-----------------------------------|------------------|------------------------|
| $R_A$         | površina sliva                    | 200 – 300        | 232                    |
| $E_0$         | razina u rezervoaru E             | 0 – 500          | 14,8                   |
| $k_{EM}$      | spec. koeficijent otjecanja E → M | $10^{-4}$ – 1    | 0,125                  |
| $k_{EC}$      | spec. koeficijent otjecanja E → C | $10^{-4}$ – 1    | 0,164                  |
| $\alpha_{EC}$ | eksponent E → C                   | 3 – 4            | 3,71                   |
| $C_0$         | razina u rezervoaru C             | 0 – 300          | 8,09                   |
| $k_{CS}$      | spec. koeficijent otjecanja C → S | $10^{-4}$ – 10   | 0,001                  |
| $\alpha_{CS}$ | eksponent C → S                   | 1,5 – 2          | 1,72                   |
| $M_0$         | razina u rezervoaru M             | 0 – 500          | 23,6                   |
| $k_{MS}$      | spec. koeficijent otjecanja M → S | $10^{-4}$ – 1    | $4,67 \cdot 10^{-4}$   |
| $k_{MC}$      | spec. koeficijent otjecanja M → C | $10^{-4}$ – 1    | 0,15                   |
| $L_0$         | razina u rezervoaru L             | 0 – 200          | 7,71                   |
| $k_{LS}$      | spec. koeficijent otjecanja L → S | 0,008 – 0,11     | 0,022                  |
| $k_{EL}$      | spec. koeficijent otjecanja E → L | $10^{-4}$ – 0,01 | $1,02 \cdot 10^{-4}$   |

Analizom mjerenih protoka u razdoblju 1995.–2021. te prognoziranih protoka za razdoblje 2022.–2060. izračunati su statistički momenti, prikazani u Tablici 5.14. Rezultati analize prognoziranih protoka na izvoru Opačac ukazuju na smanjenje srednje vrijednosti protoka, što je posljedica očekivanog smanjenja količine oborina do 10% u svim sezonama osim zime (Tablica 5.11). Unatoč povećanju standardne devijacije oborina i temperatura, standardna devijacija prognoziranih vrijednosti protoka smanjena je u odnosu na standardnu devijaciju mjerenih protoka.



**Slika 5.14** Usporedba hidrograma mjenjenih vrijednosti protoka ( $Q_{OBS}$ ) i simuliranih vrijednosti protoka ( $Q_S$ ) na izvoru Opačac uz prikaz vremenske serije ulaznih podataka oborina i referentne evapotranspiracije

Vrijednost koeficijenta asimetrije za mjerene i prognozirane protoke pokazuje da je distribucija pozitivno asimetrična, odnosno desno asimetrična, što znači da su podaci više koncentrirani s lijeve strane, dok duži repovi idu prema desno. Koeficijent asimetrije prognoziranih vrijednosti viši je nego kod mjenjenih, što, s obzirom na desnu asimetričnost distribucije, sugerira da će se u budućnosti bilježiti više ekstremno niskih protoka.

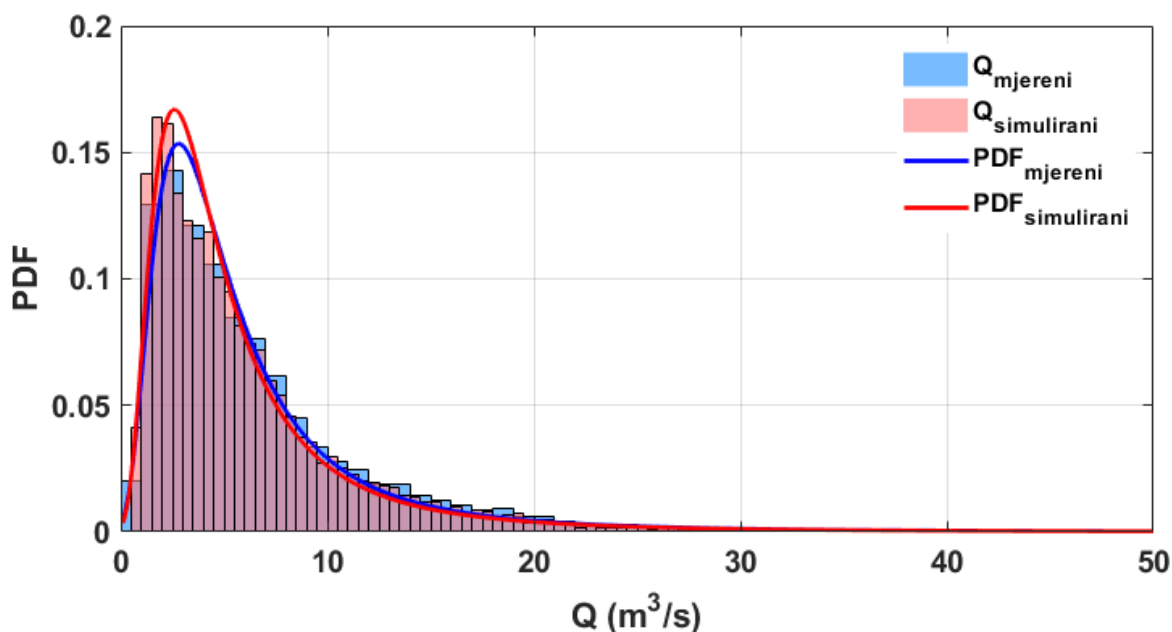
**Tablica 5.14** Vrijednosti statističkih momenata mjenjenih protoka u razdoblju 1995.-2021. te prognoziranih protoka u razdoblju 2022.-2060.

| Statistički moment       | 1995.-2021. | 2022.-2060. |
|--------------------------|-------------|-------------|
| Srednja vrijednost       | 6,349       | 5,989       |
| Standardna devijacija    | 5,205       | 5,036       |
| Koeficijent asimetrije   | 1,886       | 2,119       |
| Koeficijent zaobljenosti | 7,910       | 9,680       |

Vrijednosti koeficijenata spljoštenosti pokazuju da je distribucija šiljasta (koeficijent spljoštenosti  $> 3$ ), s izraženim vrhovima i težim repovima funkcije. Viša vrijednost koeficijenta spljoštenosti simuliranih protoka u odnosu na mjerene ukazuje na veću učestalost ekstremnih vrijednosti u odnosu na srednje vrijednosti.



Histogram mjerenih i simuliranih protoka, zajedno s funkcijom gustoće vjerojatnosti dobivenom primjenom GEV distribucije, prikazan je na slici 5.15. Ovaj prikaz jasno vizualizira razlike u raspodjeli između mjerenih i prognoziranih protoka, pri čemu pozitivna asimetrija i povećana spljoštenost naglašavaju potencijalnu učestalost ekstremnih protoka u prognoziranom razdoblju.



**Slika 5.15** Usporedba histograma mjerenih ( $Q_{\text{mjereni}}$ ) i simuliranih protoka ( $Q_{\text{simulirani}}$ ) te funkcija gustoće vjerojatnosti mjerenih ( $PDF_{\text{mjereni}}$ ) i simuliranih protoka ( $PDF_{\text{simulirani}}$ )

Rezultati simulacije pokazuju da se za odabrano razdoblje buduće klime očekuje smanjenje protoka na izvoru Opačac i povećana učestalost niskih protoka što može dovesti do promjene u dostupnosti vode. S obzirom na specifičnosti krških sustava, koji se odlikuju visokim stupnjem infiltracije i osjetljivošću na promjene u oborinskim režimima, smanjenje protoka može imati dugoročne posljedice na održivost vodnih resursa i dostupnost vode, osobito u sušnim razdobljima. Takve promjene mogu značajno utjecati na ekosustave ovisne o krškim vodama i na opskrbu vodom za lokalno stanovništvo, budući da izvor Opačac predstavlja važan vodozahvat za šire imotsko područje.

## 6. ZAKLJUČCI I SMJERNICE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA

### 6.1. Zaključci

U okviru ovog rada, provedena je sveobuhvatna analiza vremenskih nizova klimatoloških i hidroloških parametara na širem području Imotskog polja. Pritom su analizirani i prikupljeni podaci sa novopostavljenih postaja, instaliranih u okviru projekta Vode Imotske krajine (VODIME), za praćenje fizikalno-kemijskih i klimatskih parametara u vodnim tijelima te polju. Izrađen je i hidrološki model koji simulira istjecanje na izvoru Opačac te model krškog vodonosnika šireg područja Imotskog polja koji simulira istjecanje na postaji Kamenmost, na vodotoku Vrljici.

Analiza klimatoloških podataka dugih vremenskih serija provedena po prvi put na ovom području donijela je vrijedne i značajne zaključke o lokalnim klimatskim obrascima koji mogu biti značajni za predviđanje budućih klimatskih trendova i procjenu potencijalnih utjecaja klimatskih promjena na promatranom području. Budući da se radi o visoko okršenom području s vrlo složenom cirkulacijom vode u kršu, razumijevanje klimatskih trendova i varijabilnosti na klimatološkim postajama Imotski i Ričice je posebno važno, budući da ekstremne pojave povezane s porastom temperatura i sezonski slabo raspoređenim oborinama mogu imati negativan utjecaj na hidrologiju krša, a samim time i na dostupnost vode. Klimatološkom analizom potvrđeni su porasti temperature i to statistički značajan porast srednjih i maksimalnih godišnjih temperatura zraka na postaji Imotski te statistički značajan porast srednjih godišnjih temperatura na postaji Ričice. Raspodjela oborina je izrazito sezonalna s velikim razlikama u bezoborinskim i oborinskim razdobljima. Na postaji Imotski trend oborina je pozitivan, dok je na postaji Ričice negativan, ali

detektirani trendovi nisu statistički značajni. Navedeno je u skladu s analizama Europskog centra za srednjoročne vremenske prognoze (ECMWF) i Copernicus servisa za klimatske promjene (C3S) prema kojima od 1950. nije bilo značajnijeg godišnjeg trenda padalina u cijeloj Europi (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) & Copernicus Climate Change Service (C3S), 2021). Stoga, detektirani oprečni oborinski trendovi na dvjema postajama proizlaze iz utjecaja lokalnih čimbenika i prostorne preraspodjele oborina. Vrijednosti standardizirane anomalije oborina nedvojbeno ukazuju na rastuću učestalost ekstremnih vremenskih pojava, bilo pojava izrazito sušnih ili kišnih godina. Ovaj trend ukazuje na sve izraženije klimatske oscilacije i naglašava potrebu za prilagodbom na ove promjene, posebno imajući na umu potencijalni utjecaj na hidrologiju krša i dostupnost vode.

Hidrološka analiza ukazala je na divergentne promjene u vodostajima i protocima na različitim hidrološkim postajama. Smanjenje minimalnih, srednjih i maksimalnih godišnjih vodostaja bilježi se na postajama Ričice te Kamenmost, dok Ustava, Šumet i Opačac – Vrljika istovremeno bilježe povećanje vodostaja. Opadanje vrijednosti minimalnih, srednjih i maksimalnih godišnjih protoka uočeno je na postaji Opačac – Vrljika te na postaji Kamenmost koje je i statistički značajno. Pojava povećanja vodostaja uz istovremeno opadanje protoka može se objasniti akumulacijom nanosa u koritu ili neodržavanjem istog koje može prouzročiti stvaranje uspora. Statistički značajan porast temperature vode na postaji Kamenmost ukazuje da je promjena dovoljno velika da se smatra relevantnom i da nije posljedica slučajnih varijacija ili kratkotrajnih događaja jer visoki specifični toplinski kapacitet vode čini da voda sporije reagira na promjene u usporedbi s atmosferskim temperaturama. Analizom hidroloških podataka utvrđene su i lokalne fluktuacije u vodostajima i protocima kao posljedica antropogenih zahvata u slivu koji neupitno mogu modificirati prirodni režim vodotoka.

Analiza podataka prikupljenih kroz istraživački monitoring proveden u okviru projekta VODIME na sedam jezera u širem području Imotskog polja pruža značajan doprinos lokalnom i regionalnom razumijevanju funkcioniranja pojedinačnih krških oblika te njihovih interakcija s okolnim krškim masivom. Kao rezultat toga, po prvi puta se raspolaže s istovremenim mjerenjima u svim vodnim tijelima, pružajući uvid u njihove hidrološke karakteristike i međusobne odnose. Iako za sva vodna tijela vremenski nizovi nisu bili potpuni, analiza prikupljenih podataka u konačnici predstavlja velik rezultat i napredak ka boljem razumijevanju složene dinamike površinskih i podzemnih voda u kršu na ovom području. Analize vodnih tijela potvrdile su kompleksnu hidrološku dinamiku unutar krškog vodonosnika šireg područja Imotskog polja.

S obzirom na pojavnost vršnih vrijednosti te visoke vrijednosti korelacije među jezerima utvrđeno je da su sva jezera dio istog krškog vodonosnika. Razlike u fluktuacijama u razinama vode posljedica su specifičnog geološkog sastava i pojedinačnih hidrogeoloških karakteristika jezera. Zamijećena podudarnost razina u Lokvičičkim jezerima sugerira na specifične hidrološke procese objašnjive zakonom spojenih posuda, kod kojeg su razine vode u povezanim posudama jednake, a kretanje tekućine između njih slobodno. Izraženije fluktuacije u razinama vode u Modrom jezeru u usporedbi s Crvenim jezerom rezultat su veće osjetljivosti Modrog jezera na oborine te snažnijeg utjecaja regionalnog toka vode u Dinarskom kršu na ukupne količine vode u Crvenom jezeru. Promjena nagiba kod integralnih promjena volumena, kao i promjena kvazirecesijskog koeficijenta, sugeriraju na moguću povezanost Crvenog jezera s Opačcem. Međutim, s obzirom na nedostatak podataka o protocima na Opačcu u trenutku provođenja ovog istraživanja, isto se nije moglo potvrditi.

Modeliranje hidrodinamike krškog vodonosnika izvršeno je s ciljem razumijevanja i predviđanja ponašanja složenih hidroloških i geoloških sustava ovog područja. S obzirom na nepredviđenost pojava u kršu te oskudnost mjerenih podataka, primjena modeliranja doprinosi dobivanju korisnih informacija o vodonosniku u situacijama kada su terenska istraživanja ograničena ili nedostupna. Izrada modela zahtijeva specificiranje niza ulaznih parametara, a primjena različitih pristupa u modeliranju hidroloških procesa pokazala se korisnom zbog ograničenja vezanih uz nedostatak dostatnog broja ulaznih podataka. Navedeno se osobito odnosi na modeliranje u MIKE-SHE u kojem su metode za simuliranje pojedinih tokova birane sukladno dostupnosti pojedinih parametara. KARSTMOD, kao konceptualni model, koristi rainfall-runoff pristup koji se uglavnom fokusira na osnovne hidrološke procese povezane s padalinama i njihovim otjecanjem. Model istjecanja na izvoru Opačac, izrađen u KARSTMOD-u, pokazao je zadovoljavajuće rezultate simulacije protoka ( $WOBJ=0,78$ ) i dovoljnu prihvatljivost modela kao osnovu za buduće prognoze hidroloških veličina na temelju prognoziranih ulaznih parametara. Nasuprot tome, MIKE SHE je integrirani model koji uzima u obzir širi spektar hidroloških i hidrogeoloških procesa. Za krške sustave, gdje su podzemni tokovi i interakcije između površinskih voda i podzemnih voda ključni, ovaj model može pružiti precizniju simulaciju u odnosu na jednostavnije rainfall-runoff modele poput KARSTMOD-a. Za krški sustav koji je predmet disertacije, MIKE SHE je generirao prihvatljive rezultate simulacije ( $R^2=0,64$ ). Međutim da bi se iskoristio puni potencijal ovog modela, poželjno bi bilo nadograditi isti novim ulaznim podacima, primjerice mjerenjima razina podzemne vode ili podacima o profilu tla po dubini, temeljem kojih će biti moguće preciznije simulirati pojedine tokove u krškom vodonosniku.

Analiza utjecaja klimatskih promjena na dinamiku krškog vodonosnika šireg područja Imotskog polja napravljena je izradom modela izvora Opačac koji na temelju prognoziranih vrijednosti oborina i temperatura zraka prognozira buduće istjecanje na izvoru. Prognozirane vrijednosti protoka ukazuju na povećanje učestalosti ekstremnih protoka, osobito ekstremno niskih, što sugerira mogućnost promjena u dinamici vodnih resursa izvora Opačac u budućnosti. Povećana asimetrija i spljoštenost distribucije protoka ukazuju na potencijalne promjene u obrascima protoka.

Zaključno, rezultati ovog istraživanja ukazuju na promjene u lokalnim klimatskim i hidrološkim obrascima na širem području Imotskog polja. Povećanje temperature, sezonski slabo raspoređene oborine te promjene u protoku vode predstavljaju ugrozu stabilnosti vodnih resursa. Također povećanje temperature rezultira i povećanjem evaporacije i transpiracije koje posljedično smanjuju količine vode u tlu i vodotocima što dovodi do povećanog rizika od pojave suša i do mogućeg smanjenja dostupnosti vode za ljudsku potrošnju i poljoprivredu. Analiza prognoza budućih klimatskih uvjeta sugerira povećanje učestalosti ekstremno niskih protoka što dovodi do povećane ranjivosti vodnih resursa. Navedeno ukazuje na potrebu za prilagodbu sustava upravljanja vodnim resursima, uz stalnu primjenu naprednih modela za predviđanje protoka i monitoring vodnih tijela, kako bi se osigurao održivi pristup upravljanju vodama u krškom području, te smanjili negativni utjecaji klimatskih promjena na lokalnu hidrologiju i dostupnost vode.

## 6.2. Smjernice za daljnja istraživanja

Provedeno istraživanje na širem području Imotskog polja otvara mnoga pitanja i pravce za buduća istraživanja. U prvom planu, daljnja istraživanja mogu se usmjeriti na kontinuirano praćenje podataka u vodnim tijela i polju na osnovu uspostavljenog monitoring sustava. S obzirom da su klimatski i hidrološki parametri vremenski promjenjive varijable, raspoloživost duljim nizom prikupljenih podataka omogućit će nadogradnju i poboljšanje postojećih modela te će u konačnici dati bolji uvid u ponašanje ovog dinamičnog hidrološkog sustava.

Nadalje, postojanje monitoring sustava zahtjeva i njegovo održavanje, ali i daje mogućnost nadogradnje postojećih sustava s ciljem proširenja opsega budućih mjerenja. Jedan od prijedloga je instalacija piezometara na nekoliko lokacija u Imotskog polju, posebice u blizini Crvenog i Modrog jezera, koji bi dali uvid u regionalni tok vode u kršu. Također provedbom trasiranja u vodnim tijelima i na drugim lokacijama u polju mogli bi se testirati nalazi ovog istraživanja te preciznije definirati površinu sliva i kretanje podzemnih voda u okolnom krškom masivu.

Izravni doprinosi ovih mjerenja bit će ključni za bolje razumijevanje dinamike krškog vodonosnika, što će značajno unaprijediti fizikalnu interpretaciju modeliranih rezultata i njihovu primjenu u praksi. Kako bi se ostvarila potpuna slika o vodnim resursima Imotskog polja i okolnog krškog masiva, bit će neophodna suradnja s prekograničnim institucijama radi uspostave šire mreže mjerenja.

Jedan od smjerova za buduća istraživanja uključuje korištenje punih integriranih distribuiranih modela, poput Wash123D, HydroGeosphere ili ParFlow. Za njihovu uspješnu primjenu potrebni su klimatološki i hidrološki podaci, podaci o podzemnoj i površinskoj dinamici vode, kao i podaci o geologiji i korištenju zemljišta. Također, bit će potrebni snažni računalni resursi, a integracija strojnog učenja može poboljšati točnost predviđanja. Kao alat za prilagodbu šireg područja Imotskog polja klimatskim promjenama, preporučuju se modeli za predviđanje klimatskih parametara temeljenih na dubokom učenju, uz prikupljene podatke iz uspostavljenog monitoring sustava. Korištenje ovih modela može omogućiti preciznija i pravovremena predviđanja suše, čime se mogu ublažiti nepovoljni utjecaji suše, kao što su propadanje usjeva, nedostatak vode i ekonomski gubici.

Zaključno, daljnja istraživanja trebaju biti usmjerena na kontinuirano prikupljanje i praćenje podataka te integriranje novih tehnologija i metoda kako bi se detaljnije istražila kompleksnost hidrološkog sustava Imotskog polja, s posebnim naglaskom na održivost vodnih resursa u kršu i njihovu dugoročnu zaštitu.

## 7. LITERATURA

- [1] Agnew, C. T., & Chappell, A. (1999). Drought in the Sahel. *GeoJournal*, 48(4). <https://doi.org/10.1023/A:1007059403077>
- [2] Alemu, M. M., & Bawoke, G. T. (2020). Analysis of spatial variability and temporal trends of rainfall in Amhara Region, Ethiopia. *Journal of Water and Climate Change*, 11(4). <https://doi.org/10.2166/wcc.2019.084>
- [3] Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, 6(6). <https://doi.org/10.1002/joc.3370060607>
- [4] Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., & W, a B. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. *Irrigation and Drainage*. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.12.001>
- [5] Andrić, I., Bonacci, O., & Jukić, B. (2013). Rezultati najnovijih hidroloških i geomorfoloških istraživanja Crvenog jezera kod Imotskog. *Hrvatske vode*, 21(86), 344–348.
- [6] Andrić, I., Bonacci, O., & Jukić, B. (2017). Hidrološka mjerenja na Crvenom jezeru u razdoblju od 28. rujna 2013. do 10. rujna 2015. *Hrvatske vode*, 25(102), 253–258.
- [7] Andrić, I., Jukić, B., & Bonacci, O. (2018). Pregled recentnih znanstvenih istraživanja vezanih za Crveno i Modro jezero u Imotskom. U *Zavičajna baština, Problemi i perspektive u upravljanju baštinom* (str. 31–41).
- [8] Arnout Tilgenkamp. (2024). *Theil–Sen estimator*. MATLAB Central File Exchange. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/34308-theil-sen-estimator>
- [9] Asfaw, A., Simane, B., Hassen, A., & Bantider, A. (2018). Variability and time series trend analysis of rainfall and temperature in northcentral Ethiopia: A case study in Woleka sub-basin. *Weather and Climate Extremes*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2017.12.002>
- [10] Babak, O., & Deutsch, C. V. (2009). Statistical approach to inverse distance interpolation. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23(5). <https://doi.org/10.1007/s00477-008-0226-6>
- [11] Bahun, S. (1991). O postanku Crvenog i Modrog jezera kod Imotskog . *Geološki vjesnik*, 44, 275–280.
- [12] Balacco, G., Alfio, M. R., Parisi, A., Panagopoulos, A., & Fidelibus, M. D. (2022). Application of short time series analysis for the hydrodynamic characterization of a coastal karst aquifer: The Salento aquifer (Southern Italy). *Journal of Hydroinformatics*, 24(2). <https://doi.org/10.2166/hydro.2022.135>

- [13] Basha, H. A. (2020). Flow Recession Equations for Karst Systems. *Water Resources Research*, 56(7). <https://doi.org/10.1029/2020WR027384>
- [14] Baudement, C., Arfib, B., Mazzilli, N., Jouvès, J., Lamarque, T., & Guglielmi, Y. (2017). Groundwater management of a highly dynamic karst by assessing baseflow and quickflow with a rainfall-discharge model (Dardennes springs, SE France). *Bulletin de la Societe Geologique de France*, 188(6). <https://doi.org/10.1051/bsgf/2017203>
- [15] Bezak, N., Cerović, L., & Šraj, M. (2020). Impact of the Mean Daily Air Temperature Calculation on the Rainfall-Runoff Modelling. *Water*, 12(11), 3175. <https://doi.org/10.3390/w12113175>
- [16] Biondić, B., & Biondić, R. (2014). *Hidrogeologija dinarskog krša u Hrvatskoj*. Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
- [17] Blatnik, M., Gabrovšek, F., Ravbar, N., Frantar, P., & Gill, L. W. (2024). Assessment of climatic and anthropogenic effects on flood dynamics in the Cerkniško Polje (SW Slovenia) based on a 70-year observation dataset. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101609>
- [18] Bojanić, L., Ivičić, D., & Batić, V. (1981). Hidrogeologija Imotskog polja s osvrtom na značaj u regionalnom smislu. *Geološki vjesnik*, 34, 127–135.
- [19] Bonacci, O. (1987). *.: Karst Hydrology With Special Reference to the Dinaric Karst*. Springer-Verlag.
- [20] Bonacci, O. (1994). *Oborine: glavna ulazna veličina u hidrološki ciklus*. Split: GEING Krebs und Kiefer International.
- [21] Bonacci, O. (2001). Analysis of the maximum discharge of karst springs. *Hydrogeology Journal*, 9(4). <https://doi.org/10.1007/s100400100142>
- [22] Bonacci, O. (2004). Poljes. U J. Gunn (Ur.), *Encyclopedia of caves and karst science* (str. 1279–1282). Fitzroy Dearborn.
- [23] Bonacci, O. (2006). Crveno i modro jezero kod Imotskog. *Hrvatske Vode*, 14(54), 45–54.
- [24] Bonacci, O. (2009). Sinking, losing and underground karst stream- flows. *Sustainability of the karst environment - Dinaric Karst and Other Karst Regions*, 9–16.
- [25] Bonacci, O. (2010). Analiza nizova srednjih godišnjih temperatura zraka u Hrvatskoj. *Građevinar*, 62(9), 781–791.
- [26] Bonacci, O. (2012). Increase of mean annual surface air temperature in the Western Balkans during last 30 years. *Vodoprivreda*, 44(255–257), 75–89.



- [27] Bonacci, O. (2019). Air temperature and precipitation analyses on a small Mediterranean island: the case of the remote island of Lastovo (Adriatic Sea, Croatia). *Acta hydrotechnica*, 135–150. <https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2019.10>
- [28] Bonacci, O., & Andrić, I. (2014). Morphological study of Red lake in Dinaric karst based on terrestrial laser scanning and sonar system. *Acta Carsologica*, 43(2–3). <https://doi.org/10.3986/ac.v43i2.712>
- [29] Bonacci, O., Andrić, I., Vrsalović, A., & Bonacci, D. (2021). Precipitation Regime Changes at Four Croatian Meteorological Stations. *Atmosphere*, 12(7), 885. <https://doi.org/10.3390/atmos12070885>
- [30] Bonacci, O., Andrić, I., & Yamashiki, Y. (2014). Hydrology of Blue Lake in the Dinaric karst. *Hydrological Processes*, 28(4), 1890–1898. <https://doi.org/10.1002/hyp.9736>
- [31] Bonacci, O., Bonacci, D., Patekar, M., & Pola, M. (2021). Increasing trends in air and sea surface temperature in the central adriatic sea (Croatia). *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/jmse9040358>
- [32] Bonacci, O., Bonacci, D., & Roje-Bonacci, T. (2021). Different air temperature changes in continental and Mediterranean regions: a case study from two Croatian stations. *Theoretical and Applied Climatology*, 145(3–4). <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03702-0>
- [33] Bonacci, O., Patekar, M., Pola, M., & Roje-Bonacci, T. (2020). Analyses of climate variations at four meteorological stations on remote islands in the croatian part of the adriatic sea. *Atmosphere*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/atmos11101044>
- [34] Bonacci, O., & Roje-Bonacci, T. (2000a). Interpretation of groundwater level monitoring results in karst aquifers: examples from the Dinaric karst. *Hydrological Processes*, 14(14). [https://doi.org/10.1002/1099-1085\(20001015\)14:14<2423::AID-HYP104>3.0.CO;2-2](https://doi.org/10.1002/1099-1085(20001015)14:14<2423::AID-HYP104>3.0.CO;2-2)
- [35] Bonacci, O., & Roje-Bonacci, T. (2000b). Posebnosti krških vodonosnika. *Hrvatske vode*, 8(30), 25–42.
- [36] Bonacci, O., & Roje-Bonacci, T. (2004). Posebnosti krških vodonosnika. U V. Simović (Ur.), *Građevinski godišnjak* (str. 91–187). Hrvatski savez građevinskih inženjera.
- [37] Bonacci, O., & Roje-Bonacci, T. (2008). Water losses from the Ričice reservoir built in the Dinaric karst. *Engineering Geology*, 99(3–4). <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.11.014>
- [38] Bonacci, O., & Roje-Bonacci, T. (2013). Problemi koji su se pojavili pri izgradnji i funkcioniranju brana i akumulacija u kršu. *Hrvatske Vode*, 21(85).

- [39] Bonacci, O., & Željковиć, I. (2018). Differences between true mean temperatures and means calculated with four different approaches: a case study from three Croatian stations. *Theoretical and Applied Climatology*, 131(1–2), 733–743. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1993-5>
- [40] Bonacci, O., Željковиć, I., & Galić, A. (2013). Karst rivers' particularity: an example from Dinaric karst (Croatia/Bosnia and Herzegovina). *Environmental Earth Sciences*, 70(2), 963–974. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2187-9>
- [41] Bonacci, O., Željковиć, I., Trogrlić, R. Š., & Milković, J. (2013). Differences between true mean daily, monthly and annual air temperatures and air temperatures calculated with three equations: a case study from three Croatian stations. *Theoretical and Applied Climatology*, 114(1–2), 271–279. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0830-8>
- [42] Branković, Č., Cindrić, K., Gajić-Čapka, M., Güttler, I., Patarčić, M., Srnc, L., Vučetić, V., & Zaninović, K. (2009). *Peto nacionalno izvješće Republike Hrvatske prema Okvirnoj konvenciji Ujedinjenih naroda o promjeni klime (UNFCCC); Izabrana poglavlja: Opažene klimatske promjene u Hrvatskoj Scenarij klimatskih promjena Utjecaj klimatskih varijacija i promjena na biljke i na opasnost od šumskih požara.*
- [43] Branković, Č., Güttler, I., & Gajić-Čapka, M. (2013). Evaluating climate change at the Croatian Adriatic from observations and regional climate models' simulations. *Climate Dynamics*, 41(9–10), 2353–2373. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1646-z>
- [44] Burden, F., & Winkler, D. (2008). Bayesian Regularization of Neural Networks. U *Artificial Neural Networks* (str. 23–42). [https://doi.org/10.1007/978-1-60327-101-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-60327-101-1_3)
- [45] Chatfield, C. (2016). The analysis of time series: An introduction, sixth edition. U *The Analysis of Time Series: An Introduction, Sixth Edition.*
- [46] Chow, V. Te. (1959). Open-Channel Hydraulics. U *Science* (Sv. 131, Izdanje 3408).
- [47] Costa, A. C., & Soares, A. (2009). Homogenization of climate data: Review and new perspectives using geostatistics. U *Mathematical Geosciences* (Sv. 41, Izdanje 3). <https://doi.org/10.1007/s11004-008-9203-3>
- [48] Curić, Z., & Curić, B. (1999). *Školski geografski leksikon*. Hrvatsko geografsko društvo.
- [49] Cvijic, J. (1918). Hydrographie souterraine et évolution morphologique du Karst. *Recueil des travaux de l'institut de géographie alpine*, 6(4). <https://doi.org/10.3406/rga.1918.4727>
- [50] Cvijić, J. (1926). *Geomorfologija 2 (Geomorphology 2)*. Srpska Akademija Nauka i Umetnosti.
- [51] Dalbelo Bašić, B., Čupić, M., & Šnajder, J. (2011). *Umjetne neuronske mreže*. Fakultet elektrotehnike i računarstva.

- [52] de Luis, M., González-Hidalgo, J. C., Brunetti, M., & Longares, L. A. (2011). Precipitation concentration changes in Spain 1946–2005. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(5), 1259–1265. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1259-2011>
- [53] Denić-Jukić, V., Lozić, A., & Jukić, D. (2020). An application of correlation and spectral analysis in hydrological study of neighboring karst springs. *Water (Switzerland)*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/w12123570>
- [54] DHI Water & Environment. (2017). *MIKE SHE - User Guide and Reference Manual*.
- [55] DHI Water & Environment. (2024). *MIKE 1D - DHI Simulation Engine for 1D river and urban modelling*.
- [56] Doummar, J., Sauter, M., & Geyer, T. (2012). Simulation of flow processes in a large scale karst system with an integrated catchment model (Mike She) - Identification of relevant parameters influencing spring discharge. *Journal of Hydrology*, 426–427. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.021>
- [57] Drogue, C. (1980). Essai d'identification d'un type de structure de magasins carbonatés. *Mem. hors série Soc. Géol. France II*, 101–108.
- [58] Državni hidrometeorološki zavod. (2008). *Naputak za opažanja i mjerenja na glavnim meteorološkim postajama*. Državni hidrometeorološki zavod.
- [59] Dubois, E., Doummar, J., Pistre, S., & Larocque, M. (2020). Calibration of a lumped karst system model and application to the Qachqouch karst spring (Lebanon) under climate change conditions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(9), 4275–4290. <https://doi.org/10.5194/hess-24-4275-2020>
- [60] Erdelez, A., Petković, A., & Veljković, M. (2020). *Elaborat zaštite okoliša za ocjenu o potrebi procjene utjecaja na okoliš za zahvat: Uređenje kanala Runovića Jaruge od stacionaže km 0+000 do km 2+200, Splitsko-dalmatinska županija*.
- [61] European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), & Copernicus Climate Change Service (C3S). (2021). *European State of the Climate 2021 Summary*. <https://climate.copernicus.eu/ESOTC/2021>.
- [62] Fatichi, S. (2023). *Mann-Kendall Modified test (1.0.0.0)*. MATLAB Central File Exchange.
- [63] Fatoni, H., Kholis, A. N., Kurniawan, I. A., Haryono, E., Waskito, W. A., Cahyadi, A., Agniy, R. F., & Adji, T. N. (2024). Use of discharge variability, aquifer memory effect, and recession curve analysis in several springs to characterize karst aquifers in the tropical area. *Geosciences Journal*, 28(6), 925–939. <https://doi.org/10.1007/s12303-024-0034-0>

- [64] Fiorillo, F. (2009). Spring hydrographs as indicators of droughts in a karst environment. *Journal of Hydrology*, 373(3–4). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.04.034>
- [65] Fiorillo, F., & Guadagno, F. M. (2010). Karst spring discharges analysis in relation to drought periods, using the SPI. *Water Resources Management*, 24(9). <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9528-9>
- [66] Fiorillo, F., Leone, G., Pagnozzi, M., & Esposito, L. (2021). Long-term trends in karst spring discharge and relation to climate factors and changes. *Hydrogeology Journal*, 29(1). <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02265-0>
- [67] Fiorotto, V., & Caroni, E. (2013). A new approach to master recession curve analysis. *Hydrological Sciences Journal*, 58(5), 966–975. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.788248>
- [68] Ford, D., & Williams, P. (1989). Karst Hydrogeology and Geomorphology. U *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. <https://doi.org/10.1002/9781118684986>
- [69] Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall. Inc., Englewood Cliffs.
- [70] Gajić-Čapka, M., & Cindrić, K. (2011). Secular trends in indices of precipitation extremes in Croatia, 1901–2008. *Geofizika*, 28.
- [71] Gajić-Čapka, M., Cindrić, K., & Pasarić, Z. (2015). Trends in precipitation indices in Croatia, 1961–2010. *Theoretical and Applied Climatology*, 121(1–2). <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1217-9>
- [72] Gajić-Čapka, M., Tadić, M. P., & Patarčić, M. (2003). Digitalna godišnja oborinska karta Hrvatske. *Hrvatski Meteorološki Casopis*, 38.
- [73] Gajić-Čapka, M., & Zaninović, K. (2006). Long-Term Trends in Temperature, Precipitation and Runoff at the Croatian Eastern Adriatic Coast . *BALWOIS 2006*.
- [74] Garašić, M. (2001). New Speleohydrogeological Research of Crveno jezero (Red Lake) near Imotski in Dinaric Karst Area (Croatia, Europe) - International speleodiving expedition “Crveno jezero 98”. *13th International Congress of Speleology*, 457–460.
- [75] Gavazzi, A. (1903). Die Seen des Karstes (Karst Lakes). U *Abhandlungen der K. K. Geographischen Gesellschaft: Sv. 5(2)* (str. 136).
- [76] Goldscheider, N., & Drew, D. (2007). Methods in Karst Hydrogeology: IAH: International Contributions to Hydrogeology, 26. U *Groundwater*.
- [77] Gough, W. A., Žaknić-Čatović, A., & Zajch, A. (2020). Sampling frequency of climate data for the determination of daily temperature and daily temperature extrema.

- International Journal of Climatology*, 40(13), 5451–5463.  
<https://doi.org/10.1002/joc.6528>
- [78] Graham, D. N., & Butts, M. B. (2005). Flexible integrated watershed modeling with MIKE SHE. U *Watershed Models*.
- [79] Guinot, V., Savéan, M., Jourde, H., & Neppel, L. (2015). Conceptual rainfall-runoff model with a two-parameter, infinite characteristic time transfer function. *Hydrological Processes*, 29(22). <https://doi.org/10.1002/hyp.10523>
- [80] Hamed, K. H., & Ramachandra Rao, A. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204(1–4). [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
- [81] Hare, W. (2003). Assessment of Knowledge on Impacts of Climate Change - Contribution to the Specification of Art. 2 of the UNFCCC: Impacts on Ecosystems, Food Production, Water and Socio-economic Systems. U *UNT Digital Library*.
- [82] Hartmann, A., Gleeson, T., Rosolem, R., Pianosi, F., Wada, Y., & Wagener, T. (2015). A large-scale simulation model to assess karstic groundwater recharge over Europe and the Mediterranean. *Geoscientific Model Development*, 8(6). <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1729-2015>
- [83] Hartmann, A., Goldscheider, N., Wagener, T., Lange, J., & Weiler, M. (2014). Karst water resources in a changing world: Review of hydrological modeling approaches. *Reviews of Geophysics*, 52(3), 218–242. <https://doi.org/10.1002/2013RG000443>
- [84] Hartmann, A., Mudarra, M., Andreo, B., Marín, A., Wagener, T., & Lange, J. (2014). Modeling spatiotemporal impacts of hydroclimatic extremes on groundwater recharge at a mediterranean karst aquifer. *Water Resources Research*, 50(8). <https://doi.org/10.1002/2014WR015685>
- [85] Herak, M., & Stringfield, V. T. (1972). Karst: Important Karst Regions of the Northern Hemisphere. U *The Geographical Journal* (Izdanje 2). Elsevier Publishing Company.
- [86] Hirsch, R. M., & Slack, J. R. (1984). A Nonparametric Trend Test for Seasonal Data With Serial Dependence. *Water Resources Research*, 20(6). <https://doi.org/10.1029/WR020i006p00727>
- [87] Im, S., Kim, H., Kim, C., & Jang, C. (2009). Assessing the impacts of land use changes on watershed hydrology using MIKE SHE. *Environmental Geology*, 57(1). <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1303-3>
- [88] Jaswal, A., & Kumar, N. (2014). Climate variability in Dharamsala - a hill station in Western Himalayas. *Journal of Indian Geophysical Union*, 18, 336–355.

- [89] Jennings, J. N. (1971). *Karst* (Sv. 7). Australian National University Press.
- [90] Jourde, H., Mazzilli, N., Lecoq, N., Arfib, B., & Bertin, D. (2015). KARSTMOD: A generic modular reservoir model dedicated to spring discharge modeling and hydrodynamic analysis in karst. *Environmental Earth Sciences*, 1. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-17435-3\\_38](https://doi.org/10.1007/978-3-642-17435-3_38)
- [91] Jourde, H., & Wang, X. (2023). Advances, challenges and perspective in modelling the functioning of karst systems: a review. *Environmental Earth Sciences*, 82(17), 396. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11034-7>
- [92] Katz, R. W., & Glantz, M. H. (1986). Anatomy of a Rainfall Index. *Monthly Weather Review*, 114(4), 764–771. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1986\)114<0764:AOARI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1986)114<0764:AOARI>2.0.CO;2)
- [93] Kazakis, N., Chalikakis, K., Mazzilli, N., Ollivier, C., Manakos, A., & Voudouris, K. (2018). Management and research strategies of karst aquifers in Greece: Literature overview and exemplification based on hydrodynamic modelling and vulnerability assessment of a strategic karst aquifer. *Science of the Total Environment*, 643. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.184>
- [94] Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods*. 4th edition. Charles Griffin.
- [95] Kiraly, L. (1994). Groundwater flow in fractured rocks: models and reality. 14. *Mintrop Seminar über Interpretationstrategien in Exploration und Produktion, Ruhr Universität Bochum*.
- [96] Kiraly, L., Perrochet, P., & Rossier, Y. (1995). Effect of the epikarst on the hydrograph of karst springs: a numerical approach. U *Bulletin d'Hydrogeologie* (Sv. 14).
- [97] Kogovšek, B., Jemcov, I., & Petrič, M. (2023). Advanced application of time series analysis in complex karst aquifers: A case study of the Unica springs (SW Slovenia). *Journal of Hydrology*, 626. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130147>
- [98] Kovács, A. (2003). Geometry and hydraulic parameters of karst aquifers: a hydrodynamic modeling approach. *These de Doctorat, CHYN, Univ. de Neuchâtel*.
- [99] Kovačević, T. (1999). Crveno jezero - Imotski. *Hrvatska Vodoprivreda*, VIII (78), 43–46.
- [100] Larocque, M., Mangin, A., Razack, M., & Banton, O. (1998). Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France). *Journal of Hydrology*, 205(3–4). [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00155-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00155-8)
- [101] LeGrand, H. E. (1983). Perspective on karst hydrology. *Journal of Hydrology*, 61(1–3). [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90257-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90257-3)
- [102] Leibundgut, C. (1998). Vulnerability of karst aquifers. *IAHS PUBLICATION*, 247, 45–60.

- [103] Liu, Z., Wang, Y., Xu, Z., & Duan, Q. (2017). Conceptual Hydrological Models. U *Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting*. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-40457-3\\_22-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-40457-3_22-1)
- [104] Liu, Z., Zhang, Z., Zhou, C., Ming, W., & Du, Z. (2021). An adaptive inverse-distance weighting interpolation method considering spatial differentiation in 3D geological modeling. *Geosciences (Switzerland)*, *11*(2). <https://doi.org/10.3390/geosciences11020051>
- [105] Ljubenković, I. (2015). Multicriteria flood mitigation in the Imotsko-Bekijsko Polje (Croatia, Bosnia and Herzegovina). *Journal of Water and Land Development*, *26*(1), 73–81. <https://doi.org/10.1515/jwld-2015-0018>
- [106] Ljubenković, I., & Glavaš, B. (2017). Akumulacije i retencije u „presječenom“ sustavu na slivu Imotsko-Bekijskog polja. U J. Rubinić (Ur.), *ZNANSTVENO STRUČNI SKUP s međunarodnim sudjelovanjem UPRAVLJANJE JEZERIMA I AKUMULACIJAMA U HRVATSKOJ i OKRUGLI STOL o aktualnoj problematici Vranskog jezera kod Biograda na Moru* (str. 178–184). Hrvatsko društvo za zaštitu voda.
- [107] Ma, L., He, C., Bian, H., & Sheng, L. (2016). MIKE SHE modeling of ecohydrological processes: Merits, applications, and challenges. *Ecological Engineering*, *96*. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.01.008>
- [108] Malík, P., & Vojtková, S. (2012). Use of recession-curve analysis for estimation of karstification degree and its application in assessing overflow/underflow conditions in closely spaced karstic springs. *Environmental Earth Sciences*, *65*(8). <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1596-0>
- [109] Mangin, A. (1984). Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. *Journal of Hydrology*, *67*(1–4). [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(84\)90230-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(84)90230-0)
- [110] Mann, H. B. (1945). Non-parametric test of randomness against trend. *Econometrica*, *13*(3), 245–249.
- [111] Martinović, D. (2005). Imotska jezera. *Meridijani*, *12*(100), 36–53.
- [112] Mazzilli, N., Guinot, V., Jourde, H., Lecoq, N., Labat, D., Arfib, B., Baudement, C., Danquigny, C., Dal Soglio, L., & Bertin, D. (2019). KarstMod: A modelling platform for rainfall - discharge analysis and modelling dedicated to karst systems. *Environmental Modelling and Software*, *122*. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.015>

- [113] Medved, I., Pribičević, B., Medak, D., & Kuzmanić, I. (2010). Usporedba metoda interpolacije batimetrijskih mjerenja za praćenje promjena volumena jezera. *Geodetski List*, 64(2).
- [114] Mehzabin, S., & Mondal, M. S. (2021). Assessing Impact of Climate Variability in Southwest Coastal Bangladesh Using Livelihood Vulnerability Index. *Climate*, 9(7), 107. <https://doi.org/10.3390/cli9070107>
- [115] Mewded, M., Abebe, A., Tilahun, S., & Agide, Z. (2022). Climate variability and trends in the Endorheic Lake Hayk basin: implications for Lake Hayk water level changes in the lake basin, Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 11(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s40068-022-00256-6>
- [116] Milanović, P. T. (1981). Karst Hydrogeology. U *Water Resources Publications* (str. 434).
- [117] Mohamed, M. A., El Afandi, G. S., & El-Mahdy, M. E. S. (2022). Impact of climate change on rainfall variability in the Blue Nile basin. *Alexandria Engineering Journal*, 61(4). <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.08.056>
- [118] Nathan, R. J., & McMahon, T. A. (1990). Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resources Research*, 26(7), 1465–1473. <https://doi.org/10.1029/WR026i007p01465>
- [119] Ojha, A. K., Mallick, D., & Mallick, C. (2010). *Existence and Global Logarithmic Stability of Impulsive Neural Networks with Time Delay*.
- [120] Oliver, J. E. (1980). Monthly precipitation distribution: A comparative index. *The Professional Geographer*, 32(3), 300–309. <https://doi.org/10.1111/j.0033-0124.1980.00300.x>
- [121] Ozimec, R. (1999). Crveno jezero - Imotsko oko. *Hrvatski zemljopis*, 16–20.
- [122] Ozimec, R., Jalžić, B., & Jelić, D. (2017). Preliminarni izvještaj prirodoslovnih istraživanja u okviru Speleoronilačke ekspedicije Crveno jezero 2017. *Subterranea Croatica*, 34–41.
- [123] Padilla, A., & Pulido-Bosch, A. (1995). Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis. *Journal of Hydrology*, 168(1–4). [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)02648-U](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02648-U)
- [124] Palandačić, A., Bonacci, O., & Snoj, A. (2012). Molecular data as a possible tool for tracing groundwater flow in karst environment: example of *Delminichthys adspersus* in Dinaric karst system. *Ecohydrology*, 5(6), 791–797. <https://doi.org/10.1002/eco.269>
- [125] Panagopoulos, G., & Lambrakis, N. (2006). The contribution of time series analysis to the study of the hydrodynamic characteristics of the karst systems: Application on two typical



- karst aquifers of Greece (Trifilia, Almyros Crete). *Journal of Hydrology*, 329(3–4). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.023>
- [126] Parise, M., Gabrovsek, F., Kaufmann, G., & Ravbar, N. (2018). Recent advances in karst research: From theory to fieldwork and applications. U *Geological Society Special Publication* (Sv. 466, Izdanje 1). <https://doi.org/10.1144/SP466.26>
- [127] Parker, G. G. (2020). Tamm review: Leaf Area Index (LAI) is both a determinant and a consequence of important processes in vegetation canopies. U *Forest Ecology and Management* (Sv. 477). <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118496>
- [128] Patarčić, M., Gajić-Čapka, M., Cindrić, K., & Branković, Č. (2014). Recent and near-future changes in precipitation-extreme indices over the Croatian Adriatic coast. *Climate Research*, 61(2), 157–176. <https://doi.org/10.3354/cr01250>
- [129] Pearson, K. (1896). Mathematical contributions to the theory of evolution. *Proceedings of the Royal Society*, 60(1834).
- [130] Pendergrass, A. G., Knutti, R., Lehner, F., Deser, C., & Sanderson, B. M. (2017). Precipitation variability increases in a warmer climate. *Scientific Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17966-y>
- [131] Pepin, N., Bradley, R. S., Diaz, H. F., Baraer, M., Caceres, E. B., Forsythe, N., Fowler, H., Greenwood, G., Hashmi, M. Z., Liu, X. D., Miller, J. R., Ning, L., Ohmura, A., Palazzi, E., Rangwala, I., Schöner, W., Severskiy, I., Shahgedanova, M., Wang, M. B., ... Yang, D. Q. (2015). Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. U *Nature Climate Change* (Sv. 5, Izdanje 5). <https://doi.org/10.1038/nclimate2563>
- [132] Perčec Tadić, M., Pasarić, Z., & Guijarro, J. A. (2023). Croatian high-resolution monthly gridded dataset of homogenised surface air temperature. *Theoretical and Applied Climatology*, 151(1–2), 227–251. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04241-y>
- [133] Petras, I. (1986). An approach to the mathematical expression of recession curves. *Water SA*, 12(3), 145–149.
- [134] Petrik, M. (1960). Hidrografska mjerenja u okolici Imotskog (Hydrographic measurements near Imotski). U *Ljetopis JAZU* (Sv. 64, str. 266–286).
- [135] Plišić, I., Jakelić, Z., Marinović, Z., Fuštar, A., Barun, T., Mimica Koščina, Z., Vego, G., Katalinić, E., Bešlić, K., Erdelez, R., Bilić, A., Ljubas, A., Dvornik, D., Radić, A., Plazibat, A., Štambuk-Giljanović, N., Goić, S., Andričević, R., Srzić, V., & Kapelj, J. (2009). *Vodoopskrbni plan Splitsko-dalmatinske županije*.

- [136] Posavec, K., Bacani, A., & Nakic, Z. (2006). A Visual Basic Spreadsheet Macro for Recession Curve Analysis. *Ground Water*, 0(0), 060526082055001-???. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2006.00226.x>
- [137] Posavec, K., Parlov, J., & Nakić, Z. (2010). Fully Automated Objective-Based Method for Master Recession Curve Separation. *Ground Water*, 48(4), 598–603. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00669.x>
- [138] Poulain, A., Watlet, A., Kaufmann, O., Van Camp, M., Jourde, H., Mazzilli, N., Rochez, G., Deleu, R., Quinif, Y., & Hallet, V. (2018). Assessment of groundwater recharge processes through karst vadose zone by cave percolation monitoring. *Hydrological Processes*, 32(13). <https://doi.org/10.1002/hyp.13138>
- [139] Prescott, P. (2005). Student's t -Tests . U *Encyclopedia of Statistical Sciences*. <https://doi.org/10.1002/0471667196.ess2626.pub2>
- [140] Prucha, B., Graham, D., Watson, M., Avenant, M., Esterhuyse, S., Joubert, A., Kemp, M., King, J., Le Roux, P., Redelinghuys, N., Rossouw, L., Rowntree, K., Seaman, M., Sokolic, F., Van Rensburg, L., Van Der Waal, B., Van Tol, J., & Vos, T. (2016). MIKE-SHE integrated groundwater and surface water model used to simulate scenario hydrology for input to DRIFT-ARID: The Mokolo River case study. *Water SA*, 42(3). <https://doi.org/10.4314/wsa.v42i3.03>
- [141] Quinlan, J. F., Smart, P. L., Schindel, G. M., Alexander, E. C., Edwards, A. J., & Smith, A. R. (1991). Recommended administrative/regulatory definition of karst aquifer, principles for classification of carbonate aquifers, practical evaluation of vulnerability of karst aquifers, and determination of optimum sampling frequency at springs. *Hydrology. Ecology. Monitoring. and Management of Ground Water in Karst Terranes Conference (3rd. Nashville. Tenn. 1991)*. JF Quinlan and A. Stanley, Editors. National Ground Water Association. Dublin, Ohio, 573–635.
- [142] Raić, V., Ahac, A., & Papeš, J. (1978). *Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000, Tumač za list Imotski* (str. L33-23). Institut za geoloska istrazivanja, Sarajevo (1968); Savezni geoloski institut, Beograd.
- [143] Renaud, O., & Victoria-Feser, M. P. (2010). A robust coefficient of determination for regression. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 140(7). <https://doi.org/10.1016/j.jspi.2010.01.008>
- [144] Roglić, J. (1938). Imotsko Polje – Fizičko-Geografske Osobine. (Physical-Geographic Characteristics of Imotski Polje). *Posebno Izdanje Geografskog Društva* 21, 125.

- [145] Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. A., Srinivasan, R., & Hauck, L. M. (2001). Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(5). <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb03630.x>
- [146] Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation. *Anesthesia & Analgesia*, 126(5), 1763–1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>
- [147] Sekulić, G., Ivković, M., & Ćipranić, I. (2017). Modeliranje hidroloških procesa u slivnom području skadarskog jezera. *Tehnicki Vjesnik*, 24. <https://doi.org/10.17559/TV-20151120230958>
- [148] Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- [149] Shepard, D. (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference, ACM 1968*. <https://doi.org/10.1145/800186.810616>
- [150] Shirafkan, M., Mohammadi, Z., Kavousi, A., Sivellev, V., Labat, D., & Reimann, T. (2023). Toward the estimation of the transfer coefficient in karst systems: Using baseflow recession coefficient under matrix-restrained flow regime. *Journal of Hydrology*, 620. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129441>
- [151] Simon, D. (1987). Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development (Book Review). *Third World Planning Review*, 9(3). <https://doi.org/10.3828/twpr.9.3.x4k73r2p72w22402>
- [152] Singh, A. (2018). A concise review on introduction to hydrological models. *Global Research and Development Journal for Engineering*, 3(10).
- [153] Sivellev, V., Labat, D., Mazzilli, N., Massei, N., & Jourde, H. (2019). Dynamics of the Flow Exchanges between Matrix and Conduits in Karstified Watersheds at Multiple Temporal Scales. *Water*, 11(3), 569. <https://doi.org/10.3390/w11030569>
- [154] Slišković, I., & Ivičić, D. (2001). Nove spoznaje o slivu Imotskog polja. *Hrvatske vode*, 9(35), 177–185.
- [155] Stevanović, Z. (2015). Characterization of Karst Aquifer. U Z. Stevanović (Ur.), *Karst Aquifers – Characterization and Engineering* (1. izd., str. 47–125). Springer Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-12850-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-12850-4_3)

- [156] Stevanović, Z., Marinović, V., & Krstajić, J. (2021). CC-PESTO: a novel GIS-based method for assessing the vulnerability of karst groundwater resources to the effects of climate change. *Hydrogeology Journal*, 29(1). <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02251-6>
- [157] Strategija prilagodbe klimatskim promjenama u Republici Hrvatskoj za razdoblje do 2040. godine s pogledom na 2070. godinu, Pub. L. No. NN 46/2020 (2020). [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020\\_04\\_46\\_921.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020_04_46_921.html)
- [158] Sujono, J., Shikasho, S., & Hiramatsu, K. (2004). A comparison of techniques for hydrograph recession analysis. *Hydrological Processes*, 18(3), 403–413. <https://doi.org/10.1002/hyp.1247>
- [159] Šegota, T., & Filipčić, A. (2003). Köppenova podjela klima i hrvatsko nazivlje. *Geoadria*, 8(1), 17–37. <https://doi.org/10.15291/geoadria.93>
- [160] Tallaksen, L. M. (1995). A review of baseflow recession analysis. *Journal of Hydrology*, 165(1–4), 349–370. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)02540-R](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02540-R)
- [161] Tarboton, D. G. (2003). Overview and Runoff Processes. U *Rainfall-Runoff Processes*.
- [162] Toebes, C., Morrissey, W. B., Shorter, R., & Hendy, M. (1969). Base-Flow-Recession Curves. U *Handbook of Hydrological Procedures: Procedure No. 8*. A. R. Shearer, Government Printer.
- [163] Ujević Andrijić, Ž. (2019). Osvežimo znanje: Umjetne neuronske mreže. *Kemija u industriji: Časopis kemičara i kemijskih inženjera Hrvatske*, 68(5–6).
- [164] UNESCO. (2024). *UNESCO Global Geoparks Council, 8th session: report*.
- [165] Vladović, D., Stermšek, D., Piasevoli, G., Mekinić, S., Hruševar, D., Ževrnja, N., Milat, T., & Jukić, B. (2022). *Značajni krajobraz Prološko blato*. Split: Javna ustanova za upravljanje zaštićenim dijelovima prirode na području Splitsko-dalmatinske županije - „More i krš“ i Prirodoslovni muzej i zoološki vrt.
- [166] Vrsalović, A., Andrić, I., Buzjak, N., & Bonacci, O. (2022). Karst Lake’s Dynamics Analysis as a Tool for Aquifer Characterisation at Field Scale, Example of Cryptodepression—Red Lake in Croatia. *Water*, 14(5), 830. <https://doi.org/10.3390/w14050830>
- [167] Waseem, M., Mani, N., Andiego, G., & Usman, M. (2008). A Review of Criteria of Fit for Hydrological Models. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 9001.

- [168] Weiss, A., & Hays, C. J. (2005). Calculating daily mean air temperatures by different methods: implications from a non-linear algorithm. *Agricultural and Forest Meteorology*, 128(1–2), 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.08.008>
- [169] White, W. (2003). Conceptual models for karstic aquifers. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, 1(1). <https://doi.org/PNR61>
- [170] Wijngaard, J. B., Klein Tank, A. M. G., & Können, G. P. (2003). Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series. *International Journal of Climatology*, 23(6). <https://doi.org/10.1002/joc.906>
- [171] Yevjevich, V. (1987). Stochastic models in hydrology. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 1(1). <https://doi.org/10.1007/BF01543907>
- [172] Zakwan, M., & Ara, Z. (2019). Statistical analysis of rainfall in Bihar. *Sustainable Water Resources Management*, 5(4). <https://doi.org/10.1007/s40899-019-00340-3>
- [173] Zdilar, S. (2001). *Reljef zavale Imotskog polja i njegovo geokološko vrednovanje*. Augustini.
- [174] Zdilar, S. (2015). *Geomorfološka obilježja Zavale Imotskog polja i Podgorja Biokova*. Hrvatska sveučilišna naklada.
- [175] Željković, I. (2015). *Identifikacija hidroloških režima otjecanja u kršu konceptualnim i parametarskim modelima* [University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy]. <https://doi.org/10.31534/DocT.038.ZeljI>
- [176] Žugaj, R., & Plantić, K. (1997). *Hidrološke obrade za potrebe akumulacije Ričica*.

## POPIS SLIKA

|  |    |
|--|----|
| <b>Slika 1.1</b> Konceptualni model strukture krškog vodonosnika (Drogue, 1980) .....  | 3  |
| <b>Slika 1.2</b> Konceptualni model krškog vodonosnika (Hartmann, Goldscheider, i ostali, 2014).....   | 4  |
| <b>Slika 2.1</b> Prološko blato i Galipovac s pogledom na Imotsko polje (foto: Branimir Jukić).....  | 8  |
| <b>Slika 2.2</b> Karta gustoće ponikava (broj ponikava po km <sup>2</sup> ) za područje sjeveroistočno od grada Imotskog (Vrsalović i ostali, 2022).....   | 10 |
| <b>Slika 2.3</b> Geološka karta šireg područja Imotskog polja (modificirano prema: Raić i ostali, 1978) .....  | 12 |
| <b>Slika 2.4</b> Pregledna hipsometrijska karta s prikazom vodnih tokova .....   | 13 |
| <b>Slika 3.1</b> Izdvajanje recesijskog perioda, odnosno kvazirecesijske krivulje (IVC <sub>r</sub> ) iz krivulje promjene volumena u vremenu .....  | 29 |
| <b>Slika 3.2</b> Krivulja volumena Crvenog jezera u funkciji razine vode, uz prikaz poprečnog presjeka Crvenog jezera i izvora Opačac s naznačenim zabilježenim minimumom i maksimumom u Crvenom jezeru .....        | 30 |
| <b>Slika 3.3</b> Trigonometrijski prikaz kompleksnog broja u pravokutnom koordinatnom sustavu....  | 34 |
| <b>Slika 3.4</b> Prikaz građe prirodnog neurona i umjetnog neurona s ulazima $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ , tijelom neurona ( $\Sigma$ ), prijenosnom funkcijom ( $f$ ) i izlazom $y$ .....                           | 36 |
| <b>Slika 3.5</b> Struktura modela u KARSTMODU pri aktivaciji svih dostupnih odjeljaka.....   | 42 |
| <b>Slika 3.6</b> Pregledna karta s lokacijama postaja (Osnovna karta: WMS TopPlusOpen) .....   | 45 |
| <b>Slika 3.7.</b> Instalacija mjernih postaja: (a) spuštanje kabela u Modrom jezeru, (b) dojavna stanica sa solarnim panelom u jezeru Galipovac, (c) unutrašnjost dojavne stanice instalirane u Crvenom jezeru ..... | 47 |
| <b>Slika 3.8</b> Građa višeparametarske sonde OTT PLS-C (Izvor: Operating instructions, Pressure Probe with Conductivity Sensor OTT PLS-C).....  | 47 |
| <b>Slika 4.1</b> Prikaz srednjih mjesečnih temperatura i standardnih devijacija na postajama Imotski i Ričice.....   | 50 |
| <b>Slika 4.2</b> Prikaz godišnjih (a) minimalnih, (b) srednjih i (c) maksimalnih temperatura na postajama Imotski i Ričice .....   | 51 |
| <b>Slika 4.3</b> Godišnje minimalne (a), srednje (b) i godišnje maksimalne (b) temperature zraka na postaji Imotski u periodu od 1981. godine do 2021.....   | 52 |
| <b>Slika 4.4</b> Prikaz prosječne mjesečne količine oborina i standardnih devijacija na postajama Imotski i Ričice.....  | 55 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Slika 4.5</b> Prostorna distribucija prosječnih godišnjih količina oborina na širem području Imotskog polja.....   | 57 |
| <b>Slika 4.6</b> Pregled Pearsonovih koeficijenata determinacije za godišnje količine oborina između susjednih postaja u razdoblju od 1993. do 2021. godine .....   | 58 |
| <b>Slika 4.7</b> Godišnje količina oborina i trendovi na postaji Imotski od 1981. do 2021. godine (a) i usporedba godišnjih oborina i trendova na postajama Imotski i Ričice u razdoblju od 1993. do 2021. godine (b) ..... | 59 |
| <b>Slika 4.8</b> Prikaz empirijske raspodjele (a) i kumulativne funkcije distribucije (b) maksimalnih mjesečnih i godišnjih oborina na postajama Imotski i Ričice prema GEV distribuciji .....                              | 60 |
| <b>Slika 4.9</b> Indeks koncentracije oborina (PCI) na godišnjoj razini na postajama Imotski i Ričice   | 61 |
| <b>Slika 4.10</b> Mjesečna količina oborina 1997., 2006. i 2020. godine na postaji Imotski za koje je sukladno vrijednostima PCI mjesečni indeks koncentracije oborina klasificiran kao umjeren, nizak i visok .....        | 62 |
| <b>Slika 4.11</b> Standardizirana anomalija oborina na postajama Imotski i Ričice.....  | 63 |
| <b>Slika 4.12</b> Karta hidroloških postaja DHMZ-a na širem području Imotskog polja (Osnovna karta: WMS TopPlusOpen).....   | 64 |
| <b>Slika 4.13</b> Prikaz kretanja (a) minimalnih, (b) srednjih i (c) maksimalnih vodostaja na hidrološkoj postaji Ričice .....  | 66 |
| <b>Slika 4.14</b> Prikaz kretanja (a) srednjih i (b) maksimalnih godišnjih vodostaja na hidrološkoj postaji Ustava – Prološko blato; $H_0$ = kota nule vodokaza od 269.071 m n.m. ....                                      | 67 |
| <b>Slika 4.15</b> Prikaz kretanja (a) srednjih i (b) maksimalnih godišnjih vodostaja na hidrološkoj postaji Šumet – Sija; $H_0$ = kota nule vodokaza od 267.829 m n.m.....  | 68 |
| <b>Slika 4.16</b> Prikaz kretanja (a) srednjih i (b) maksimalnih godišnjih protoka na hidrološkoj postaji Šumet – Sija .....  | 69 |
| <b>Slika 4.17</b> Prikaz kretanja (a) minimalnih, (b) srednjih i (c) maksimalnih godišnjih vodostaja na hidrološkoj postaji Opačac – Vrljika.....   | 70 |
| <b>Slika 4.18</b> Prikaz kretanja (a) minimalnih, (b) srednjih i (c) maksimalnih godišnjih protoka na hidrološkoj postaji Opačac – Vrljika.....   | 70 |
| <b>Slika 4.19</b> Karta s postajama Opačac – Vrljika, Opačac – Glavni natapni kanal i Kamenmost ..  | 71 |
| <b>Slika 4.20</b> Prikaz kretanja (a) srednjih i (b) maksimalnih godišnjih vodostaja na hidrološkoj postaji Opačac – Glavni natapni kanal.....  | 72 |
| <b>Slika 4.21</b> Prikaz kretanja (a) srednjih i (b) maksimalnih godišnjih protoka na hidrološkoj postaji Opačac – Glavni natapni kanal.....  | 72 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Slika 4.22</b> Prikaz kretanja (a) minimalnih, (b) srednjih i (c) maksimalnih godišnjih vodostaja na hidrološkoj postaji Kamenmost.....   | 73 |
| <b>Slika 4.23</b> Prikaz kretanja (a) minimalnih, (b) srednjih i (c) maksimalnih godišnjih protoka na hidrološkoj postaji Kamenmost.....   | 74 |
| <b>Slika 4.24</b> Prikaz kretanja (a) minimalnih, (b) srednjih i (c) maksimalnih godišnjih temperatura vode na hidrološkoj postaji Kamenmost .....   | 74 |
| <b>Slika 4.25</b> Integralne promjene volumena Crvenog jezera s imputiranim nedostajućim vrijednostima (a) i transformirane vrijednosti integralnih promjena volumena $IVC_r$ (b).....   | 77 |
| <b>Slika 4.26</b> Usporedba oborina na mjernoj postaji Imotski s integralnim promjenama volumena u Crvenom jezeru ( $IVC_r$ ), razinama vode u jezeru (H), naznačenom nadmorskom visinom izvora Opačac te s protocima na izvoru Opačac (Q Opačac).....   | 78 |
| <b>Slika 4.27</b> Glavna recesijska krivulja dobivena korištenjem Prilagođene matching strip metode, Tabulation metode i metode po Petrasu .....   | 79 |
| <b>Slika 4.28</b> Autokorelacijska funkcija integralnih promjena volumena u Crvenom jezeru i protoka na Opačcu.....  | 80 |
| <b>Slika 4.29</b> Kros-korelacijska funkcija protoka na Opačcu i integralnih promjena volumena u Crvenom jezeru ( $IVC_r$ )(a) te kros-korelacijska funkcija protoka na Opačcu i integralnih promjena volumena Crvenog jezera u kombinaciji s količinom oborina s mjerne postaje Imotski (b).....                            | 81 |
| <b>Slika 4.30</b> Prikaz spektralne funkcije gustoće S (f) integralnih promjena volumena te protoka na Opačcu na logaritamskom (a) i linearnom mjerilu (b).....  | 81 |
| <b>Slika 4.31</b> Funkcija koherencije $CO_{xy}$ , fazna funkcija $\Phi_{xy}$ i funkcija prigušenja ili pojačanja $G_{xy}$ oborina s integralnim promjenama volumena u Crvenom jezeru i protocima na Opačcu.....   | 82 |
| <b>Slika 4.32.</b> Prikaz hijetograma s meteorološke postaje Runovići (a), kretanja razina vode u Ričicama (b) te Galipovcu, Mamića jezeru, Knezovića jezeru, Crvenom i Modrom jezeru i u Prološkom blatu (c).....   | 86 |
| <b>Slika 4.33</b> Prikaz hijetograma s meteorološke postaje Runovići te promjene razina vode u Galipovcu, Mamića jezeru, Knezovića jezeru, Crvenom jezeru, Modrom jezeru, Prološkom blatu i Ričicama (razine prilagođene umanjnjem od 100 m zbog grafičke preglednosti) za razdoblje od 1. do 28. studenog 2023. godine..... | 87 |
| <b>Slika 4.34</b> Matrica korelacija između razina vode u Ričicama (RI), Knezovića jezeru (KN), Galipovcu (GAL), Mamića jezeru (MAM), Prološkom blatu (PB), Modrom jezeru (MJ) i Crvenom jezeru (CJ) .....   | 88 |
| <b>Slika 4.35</b> Prikaz kretanja temperature vode (T) i električne vodljivosti (EC) u jezerima za raspoložive nizove podataka .....   | 90 |



|  |     |
|--|-----|
| <b>Slika 4.36</b> Autokorelacijske funkcije (ACF) razina vode u jezerima .....   | 91  |
| <b>Slika 5.1</b> Struktura modela izvora Opačac.....   | 95  |
| <b>Slika 5.2</b> Generalni prikaz strukture modela s dva odjeljka A i B.....   | 96  |
| <b>Slika 5.3</b> Usporedba hidrograma mjerenih vrijednosti protoka ( $Q_{OBS}$ ) i simuliranih vrijednosti protoka ( $Q_S$ ) na izvoru Opačac uz prikaz vremenske serije ulaznih podataka oborina i referentne evapotranspiracije.....                             | 99  |
| <b>Slika 5.4</b> Struktura modela izvora Opačac s odjeljkom L koje simulira Crveno jezero.....   | 100 |
| <b>Slika 5.5</b> Usporedba hidrograma mjerenih vrijednosti protoka ( $Q_{OBS}$ ) i simuliranih vrijednosti protoka ( $Q_S$ ) na izvoru Opačac za model s Crvenim jezerom, uz prikaz vremenske serije ulaznih podataka oborina i referentne evapotranspiracije..... | 102 |
| <b>Slika 5.6</b> Modelirani hidrološki procesi u MIKE SHE-u (modificirano prema Tarboton (2003)) .....   | 103 |
| <b>Slika 5.7</b> Prikaz konceptualnog modela s lokacijama postaja uzetih u obzir pri modeliranju (podloga: Google Satellite) .....   | 104 |
| <b>Slika 5.8</b> Prikaz topografije terena, uz definiran sliv te domenu modela i simulirane vodotoke.....  | 105 |
| <b>Slika 5.9</b> Krivulja promjene površine jezera u funkciji razine vode .....  | 106 |
| <b>Slika 5.10</b> Mjereni ( $Q_{OBS}$ ) i simulirani protoci ( $Q_S$ ) na postaji Kamenmost za periode kalibracije i validacije modela jednodimenzionalnog toka u vodotocima .....   | 108 |
| <b>Slika 5.11</b> Podaci o pokrovu i namjeni zemljišta prema Corine Land Cover 2018.....   | 110 |
| <b>Slika 5.12</b> Struktura modela s primjenom metode linearnog rezervoara (modificirano prema Graham & Butts (2005)) .....  | 112 |
| <b>Slika 5.13</b> Mjereni ( $Q_{OBS}$ ) i simulirani protoci ( $Q_S$ ) na postaji Kamenmost za periode kalibracije i validacije integriranog modela u MIKE SHE-u.....  | 114 |
| <b>Slika 5.14</b> Usporedba hidrograma mjerenih vrijednosti protoka ( $Q_{OBS}$ ) i simuliranih vrijednosti protoka ( $Q_S$ ) na izvoru Opačac uz prikaz vremenske serije ulaznih podataka oborina i referentne evapotranspiracije.....                            | 118 |
| <b>Slika 5.15</b> Usporedba histograma mjerenih ( $Q_{mjereni}$ ) i simuliranih protoka ( $Q_{simulirani}$ ) te funkcija gustoće vjerojatnosti mjerenih ( $PDF_{mjereni}$ ) i simuliranih protoka ( $PDF_{simulirani}$ ).....                                      | 119 |

## POPIS TABLICA

|  |     |
|--|-----|
| <b>Tablica 3.1</b> Pregled postojećih klimatoloških i hidroloških postaja DHMZ-a.....  | 46  |
| <b>Tablica 4.1</b> Magnitude trenda ( $\beta$ ) i rezultati M–K testa (p) za serije godišnjih minimalnih, srednjih i maksimalnih temperatura na postaji Imotski (IM) i Ričice (RI) u period od 1993. do 2021. godine ..... | 51  |
| <b>Tablica 4.2</b> Magnitude trenda ( $\beta$ ) i rezultati M–K testa (p) za seriju godišnjih minimalnih, srednjih i maksimalnih temperatura na postaji Imotski u period od 1981. do 2021. godine .....                    | 53  |
| <b>Tablica 4.3</b> Minimalne, srednje i maksimalne mjesečne količine oborina, kao i koeficijenti varijacije (CV) srednjih mjesečnih oborina na postajama Imotski i Ričice u periodu od 1993-2021. ....                     | 56  |
| <b>Tablica 4.4</b> Magnituda trenda ( $\beta$ ) i rezultat M–K testa (p) za seriju godišnjih količina oborina na postaji Imotski u periodu od 1981. do 2021. godine .....  | 58  |
| <b>Tablica 4.5</b> Magnitude trenda ( $\beta$ ) i rezultati M–K testa (p) za serije godišnjih količina oborina na postajama Imotski i Ričice u periodu od 1993. do 2021. godine .....                                      | 59  |
| <b>Tablica 4.6</b> Rezultati KS testa za postaje Imotski i Ričice.....   | 60  |
| <b>Tablica 4.7</b> Maksimalne godišnje i maksimalne mjesečne količine oborina te odgovarajući povratni periodi izračunati za postaje Imotski i Ričice .....  | 61  |
| <b>Tablica 4.8</b> Pregled hidroloških postaja, mjenjenih parametara te perioda dostupnosti podataka   | 65  |
| <b>Tablica 4.9</b> Minimalni, srednji i maksimalni protoci zabilježeni na hidrološkim postajama Kamenmost, Opačac – Vrljika, Opačac – Glavni natapni kanal i Šumet – Sija u odgovarajućim vremenskim periodima .....       | 75  |
| <b>Tablica 4.10</b> Vrijednosti kvazirecesijskih koeficijenata prema odabranim metodama.....   | 79  |
| <b>Tablica 4.11</b> Pregled kota nula mjernih uređaja na hidrološkim postajama .....   | 85  |
| <b>Tablica 4.12</b> Tumačenje vrijednosti Perasonovog koeficijenta korelacije (Schober i ostali, 2018) .....   | 88  |
| <b>Tablica 5.1</b> Parametri modela, zajedno s rasponima njihovih vrijednosti i optimalnim kalibriranim vrijednostima parametara .....   | 98  |
| <b>Tablica 5.2</b> Vrijednosti višeciljne funkcije WOBJ i parametara učinkovitosti modela NSE i BE za periode kalibracije i validacije modela.....   | 99  |
| <b>Tablica 5.3</b> Parametri modela, zajedno s rasponima njihovih vrijednosti i optimalnim kalibriranim vrijednostima parametara za model izvora Opačac te Crvenog jezera .....  | 101 |
| <b>Tablica 5.4</b> Vrijednosti višeciljne funkcije WOBJ i parametara učinkovitosti modela NSE i BE za periode kalibracije i validacije modela s Crvenim jezerom .....  | 101 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tablica 5.5</b> Rasponi parametara modela te kalibrirane vrijednosti parametara modela .....   | 107 |
| <b>Tablica 5.6</b> Vrijednosti parametara učinkovitosti modela $R^2$ , NSE i BE za kalibrirani i validirani model jednodimenzionalnog toka u vodotocima .....                   | 108 |
| <b>Tablica 5.7</b> Pregled parametara i kalibriranih vrijednosti parametara za modeliranje nesaturiranog toka .....   | 111 |
| <b>Tablica 5.8</b> Pregled parametara i kalibriranih vrijednosti parametara za modeliranje lateralnog toka .....  | 112 |
| <b>Tablica 5.9</b> Pregled parametara i kalibriranih vrijednosti parametara za modeliranje baznog toka .....  | 113 |
| <b>Tablica 5.10</b> Vrijednosti parametara učinkovitosti modela $R^2$ , NSE i BE za kalibrirani i validirani integrirani model u MIKE SHE-u .....                               | 114 |
| <b>Tablica 5.11</b> Prognozirane vrijednosti promjene srednje vrijednosti i standardne varijacije oborina i temperatura zraka za drugo razdoblje buduće klime.....              | 116 |
| <b>Tablica 5.12</b> Vrijednosti višeciljne funkcije WOBJ i parametara učinkovitosti modela NSE i BE za period kalibracije .....   | 116 |
| <b>Tablica 5.13</b> Parametri modela, zajedno s rasponima njihovih vrijednosti i optimalnim kalibriranim vrijednostima parametara za model izvora Opačac te Crvenog jezera..... | 117 |
| <b>Tablica 5.14</b> Vrijednosti statističkih momenata mjerenih protoka u razdoblju 1995.-2021. te prognoziranih protoka u razdoblju 2022.-2060.....                             | 118 |

## ŽIVOTOPIS

Adrijana Vrsalović, mag.ing.aedif. rođena je 14. studenog 1994. godine u Supetru. Osnovnu školu završila je u Bolu, nakon čega završava III. gimnaziju, prirodoslovno-matematičkog programa u Splitu. Na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu 19. srpnja 2019. godine diplomira kod doc.dr.sc. Davora Bojanića na temu „Hidraulička analiza i model Vranskog jezera u postojećem stanju“ te stječe stručni naziv magistra inženjera građevinarstva.

Završetkom fakulteta zapošljava se kao projektant pripravnik u projektantskom uredu Akvedukt d.o.o. gdje sudjeluje u izradi idejnih, glavnih i izvedbenih projekata komunalne infrastrukture.

Od rujna 2020. godine do rujna 2023. godine obavlja posao asistenta za rad na projektu Operativnog programa „Konkurentnost i kohezija 2014-2020“, u sklopu poziva „Shema za jačanje primijenjenih istraživanja za mjere prilagodbe klimatskih promjena“ pod nazivom „VODIME – Vode Imotske krajine“. Akademske godine 2020./2021. upisala je Poslijediplomski znanstveni studij iz znanstvenog područja Tehničkih znanosti, znanstveno polje Građevinarstvo, smjer Hidrotehnika. Od prosinca 2023. godine do prosinca 2024. godine radi kao projektant suradnik u projektantskom uredu Hidro Ekspert d.o.o.

U proteklom periodu objavila je u koautorstvu jedanaest znanstvenih i preglednih radova u međunarodno priznatim časopisima, jedan znanstven rad u zbornicima skupova s međunarodnim recenzijama i jedan sažetak u domaćem zborniku skupa.