

Vodni režim Vranskog jezera u Dalmaciji i klimatski utjecaji

Rubinić, Josip

Doctoral thesis / Disertacija

2014

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:188:405835>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-22**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka Library - SVKRI Repository](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Josip Rubinić

**VODNI REŽIM VRANSKOG JEZERA
U DALMACIJI I KLIMATSKI
UTJECAJI**

DOKTORSKI RAD

Rijeka, 2014.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Josip Rubinić

**VODNI REŽIM VRANSKOG JEZERA
U DALMACIJI I KLIMATSKI
UTJECAJI**

DOKTORSKI RAD

Mentor: prof. dr. Ranko Žugaj
Komentor: prof. dr. Nevenka Ožanić

Rijeka, 2014.

UNIVERSITY OF RIJEKA
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Josip Rubinić

**WATER REGIME OF VRANSKO LAKE
IN DALMATIA AND CLIMATE IMPACTS**

DOCTORAL THESIS

Mentor: prof. dr. Ranko Žugaj
Co-mentor: prof. dr. Nevenka Ožanić

Rijeka, 2014.

Mentor rada: prof. dr. sc. Ranko Žugaj

Komentor: prof. dr. sc. Nevenka Ožanić

Doktorski rad obranjen je dana _____ u Rijeci

pred povjerenstvom u sastavu:

1. Prof.dr.sc., Nevenka Ožanić, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci,
Hrvatska (predsjednik Povjerenstva)
2. Prof.dr.sc. Ranko Žugaj, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u
Zagrebu, Hrvatska
3. Prof.dr.sc.Čedomir Benac, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci,
Hrvatska
4. Izv.prof.dr.sc.Barbara Karleuša, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci,
Hrvatska
5. Doc.dr.sc. Marija Šperac, Građevinski fakultet Sveučilišta Josipa Jurja
Strossmayera u Osijeku, Hrvatska

ZAHVALA

Dug je popis osoba i institucija koje su utjecale na moj osobni izbor da se u svom dugogodišnjem istraživačkom radu bavim upravo hidrologijom i problematikom vodnih resursa u kršu, iz čega je i proizašao ovaj doktorski rad. U prvom redu zahvaljujem mentoru prof. Ranku Žugaju na ukazanoj pomoći prilikom izrade doktorskog rada, brojnim sugestijama i brižljivom pregledu, a iznad svega na svesrdnoj podršci, optimizmu i ugodnom ozračju prilikom njegove izrade. Na ukazanoj podršci također zahvaljujem i komentorici prof. Nevenki Ožanić na čiji sam poticaj i došao raditi na fakultet nakon što smo više godina dijelili entuzijazam i zadovoljstvo istraživanja jednog drugog Vranskoga jezera, onoga na otoku Cresu, te sam tako dobio privilegiju baviti se poslom koji mi predstavlja veliko zadovoljstvo.

Na svom doprinosu pri izradi ove disertacije zahvaljujem i brojnim drugim kolegicama i kolegama s Građevinskog fakulteta Rijeka, prije svega onima sa Zavoda za hidrotehniku i geotehlike. Među njima posebno je za istaknuti prof. Čedomira Benca, prof. Barbaru Karleušu te meni najbližeg suradnika Igora Ružića. Zahvalu na pomoći vezanoj uz izradu ovog doktorskog rada dugujem i doc. Mariji Šperac s Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Osijeku.

Izniman doprinos mome interesu za hidrologiju krša dugujem i nekolicini kolega iz ranijih razdoblja moga života, no bez kojega bi rad na ovom doktorskom radu bio ne samo vrlo prikraćen, nego ga vjerojatno ne bi ni bilo. U tom smislu zahvalnost ponajprije i ponajviše dugujem kolegi Miljenku Bakoti iz Hrvatskih voda iz Rijeke koji mi je nesebično otvorio vrata hidrologije, te akademiku Mladenu Juračiću s Prirodoslovno matematičkog fakulteta u Zagrebu koji me je potaknuo i pomogao mi da objavim svoj prvi rad i tako se usmjerim ka znanstveno-istraživačkom radu. Veliku zahvalnost također dugujem kolegi

Mirku Tomašiću iz Istarskih ugljenokopa iz Labina koji mi je u okviru zajedničkog rada na više projekata približio saznanja o podzemlju, kolegi Ivici Pavletiću iz DHMZ-a na brojnim odgovorima i još više njegovim pronicljivim pitanjima iz područja hidrologije, prof. emeritusu Ognjenu Bonacciju s Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu na njegovom doprinosu zadovoljavanja mojih interesa u domeni hidrologije krša, pok. prof. Borisu Kompareu s Fakulteta za gradbeništvo in geodeziju Univeziteta u Ljubljani što mi je s njegovim ogromnim entuzijazmom približio mogućnosti primjene metoda umjetne inteligencije u hidrologiji, te kolegama Dušku Marijanu iz HE Tribalj i pok. Ivanu Simčiću iz DHMZ-a koji su mi približili problematiku hidrometrije i ukazali na njen značaj za kasnije hidrološke obrade i interpretacije.

Posebnu zahvalnost dugujem i kolegici Ani Katalinić iz PP Vransko jezero koja je sa mnom nesebično podijelila svoj interes, saznanja i znatiželju vezanu uz Vransko jezero. Na taj način mi je ne samo pomogla da još cjelovitije upoznam njegove ljepote i tajne, nego i spoznam u kolikoj su mjeri za jezero, uz hidrologiju, važne i životne zajednice bilja, životinja, praživotinja i drugih mikroorganizama, čime je posredno promijenila tijek nekih mojih ranijih istraživanja na nekim drugim lokalitetima.

Rad na doktoratu ne bi bio moguć bez neposredne pomoći mojih kolegica i kolega, a prije svega dragih prijatelja i iz niza drugih fakulteta i institucija među kojima ima i mojih bivših studenata. Među njima je za istaknuti PP Vransko jezero, DHMZ, Hrvatske vode (Split, Zagreb, Rijeka, Zadar i Šibenik), uz čiji sam nesebični angažman dolazio do potrebnih podloga, programa, ili su mi pak pomogli oko mjerenja, tehničkog oblikovanja ili na bilo koji drugi način pridonijeli tome radu. Kako je moj angažman na doktorskom radu malo podulje trajao pa su ga onda pratile i razne promjene, teško je bilo pronaći neki najpravedniji redoslijed imenovanja svih onih kolegica i kolega, a prije svega prijateljica i prijatelja, koji su mi pomagali u bilo kojim fazama rada ili omogućavali da se na miru posvetim radu, pa sad zajedno sa mnom iskreno dijele zadovoljstvo što je taj rad zaključen. Možda je stoga onda

nekako najpravednije da ih spomenem tako da ih navedem poimence po abecednom red. Stoga jedno ogromno HVALA i Antoniju, Andreju, Bojani, Branku, Dariji, Darku, Dijani, Domeniki, Draženu, Gordani, Igoru, Ivani, Janji, Marini, Mateju, Mirjani, Mladenu, Nataši, Najli, Robiju, Sanji, Sonji, Slobodanu, Tatjani, Tomislavi, Vesni, Višnji, dvama Ivanima (Güttleru i Paiću), te čak trima Majama (Čuže-Denona, Oštrić i Radišić) ... kao i svim onima koje nisam stigao ili sjetio ih se spomenuti, a pomogli su mi na bilo koji način...

Zahvaljujem i svojoj obitelji, i to kako na neposrednoj tehničkoj pomoći pri izradi ovog doktorskog rada mojim juniorima Andriji i Dori, tako i na potpori i strpljenju supruzi Snježani, majci Mariji te ocu Andriji koji, nažalost, nije dočeo njegov završetak. Znam koliko bi se radovao, tako da mu kao zahvalnost za sve što mi je pružio onda barem ovako posvećujem ovaj rad.

SAŽETAK

U doktorskom je radu analiziran vodni režim krškoga priobalnog Vranskog jezera u Dalmaciji (Hrvatska). Vransko jezero je kriptodepresija u neposrednoj blizini mora. S morem komunicira kroz krško podzemlje te putem kanala prokopanog još u 18. stoljeću zbog čega se u iznimno sušnim razdobljima jezerske vode zaslanjuju. Tada se salinitet višestruko povećava u odnosu na uobičajen te ugrožava jezerski ekosustav, inače zaštićen kao park prirode. U radu se analiziraju trendovi oborina, vodna bilanca jezera, temperatura zraka, dotoci u jezero te kolebanja razina jezera, mora i sadržaj klorida. Utvrđeno je da je Vransko jezero vodni resurs u kojem se već u sadašnjosti osjeća utjecaj klimatskih promjena/varijacija. Nastavljanjem njihove prisutnosti u pitanje bi mogla doći opstojnost jezera kao slatkovodnog/bočatog sustava.

Zbog krških značajki sliva i jezerskoga prostora dotoci i gubici vode iz jezera se samo dijelom hidrološki prate, pa je razrađena metodologija za njihovu ukupnu ocjenu. Modelska istraživanja uključivala su određivanje konceptualnoga modela djelovanja jezerskoga sustava, kao i modela dotoka u jezerski sustav. Primijenjena su simulacijska modeliranja hidroloških procesa vezanih uz istraživani prostor Vranskoga jezera, kao i širega regionalnog prostora. Izrađen je model za ocjenu ukupnih godišnjih dotoka u jezerski sustav u uvjetima očekivanoga nastavka već zabilježenih klimatskih promjena/varijacija do 2100., pri čemu su korišteni rezultati procjene hoda godišnjih oborina i temperatura zraka modelima RegCM3 i Aladin. Modelima strojnoga učenja provedena su i modeliranja unutargodišnjih promjena hidroloških stanja u jezeru i njegove kakvoće (sadržaja klorida). Dobiveni rezultati su pokazali da primjena te generacije modela omogućava, kako otkrivanje inače teško

utvrđljivih međuzavisnosti i u tako složenim sustavima kao što su vodni sustavi u kršu, tako i simulaciju ponašanja takvih sustava u promijenjenim uvjetima s prognozama stanja sustava putem karakterističnih hidroloških pokazatelja – razina vode, količine zaslanjivanja i slično.

Ključne riječi: modeliranje stanja i promjena, zaslanjivanje, klimatski utjecaji, vodna bilanca jezera, hidrologija krša, Vransko jezero

ABSTRACT

The doctoral dissertation analyses the water regime of coastal karst Vransko Lake in Dalmatia (Croatia). This is a crypto-depression in the immediate vicinity of the sea with which it communicates through the karst underground and through a canal dug back in the 18th century. For that reason, the lake water becomes saline in extremely dry periods, when the salinity increases several times in relation to the standard level, endangering the lake ecosystem protected as a nature park. The paper analyses the lake water balance and precipitation trends, air temperature, inflows to the lake and oscillations in the levels of the lake, the sea and the chloride content. It has been identified that Vransko Lake is a water resource where the impact of the climate change/variability is already felt and that their continuation might jeopardize the existence of the lake as a freshwater/brackish system.

Due to karst characteristics of the basin and the lake area, the inflows of water to the lake and losses of water from the lake are only partially monitored in hydrological terms, which is why a methodology for their overall evaluation has been developed. The model investigations included the definition of a conceptual model of the action of the lake system, as well as of the model of inflow into the lake system. Simulation modelling of hydrologic processes related to the investigated area of Vransko Lake as well as of the wider region was applied. A model was developed for the evaluation of overall annual inflows into the lake system in the conditions of the expected continuation of the already registered climate change/variability until the year 2100, using the results of estimation of the distribution of annual precipitation and air temperatures obtained from the RegCM3 and Aladin models. Using the machine learning models, annual changes of hydrological conditions in the lake and

its quality (chloride content) were modelled. The obtained results show that the application of the models of this generation facilitates both the discovery of interrelations in systems as complex as aquatic systems in the karst and the simulation of the behaviour of such systems in the modified circumstances, with system status forecasts on the basis of characteristic hydrologic indicators – water level, scope of salinization, etc.

Keywords: Modelling of status and changes, salinization, climate impacts, lake water balance, karst hydrology, Vransko Lake

Ako nema izvora odakle bi vodu dovozili, potrebno je kopati zdence. Kod toga kopanja ne treba raditi nepromišljeno, nego se moraju pomnjivo i s velikom ozbiljnošću uvažiti prirodni zakoni.

*Marcus Vitruvius Pollio, I st. p.n.e.
(De Architectura Libri Decem –
prema izdanju IGH Zagreb (1997))*

SADRŽAJ:

1.	UVOD.....	1
1.1.	PROBLEMSKI OKVIR ISTRAŽIVANJA	1
1.2.	CILJ I SADRŽAJ RADA	5
1.3.	REZULTATI PRETHODNIH ISTRAŽIVANJA	7
2.	POLAZIŠTA	11
2.1.	OPĆE ZNAČAJKE PRIOBALNIH KRŠKIH VODONOSNIKA I VODNIH SUSTAVA	11
2.2.	KLIMATSKE PROMJENE/VARIJACIJE NA ŠIREM REGIONALNOM PROSTORU I NJIHOVO PRIKAZIVANJE	20
2.3.	OSNOVNE ZNAČAJKE VRANSKOGA JEZERA I NJEGOVA SLIVA	26
2.4.	GEOLOŠKA GRAĐA I HIDROGEOLOŠKE OSOBITOSTI SLIVA VRANSKOGA JEZERA	31
2.5.	JEZERSKI PROSTOR, HIDROTEHNIČKI ZAHVATI I KORIŠTENJE VODA U SLIVU	39
2.6.	HIDROLOŠKI MODEL DJELOVANJA VRANSKOG JEZERA, NJEGOVA KRŠKOG VODONOSNIKA I MORA.....	51
3.	PODLOGE I METODE	55
3.1.	OPĆE NAPOMENE.....	55
3.2.	MJERNO-OSMATRAČKE POSTAJE I RASPOLOŽIVI KLIMATOLOŠKI I HIDROLOŠKI PODACI	56
3.3.	PRAĆENJE KAKVOĆE VODE VRANSKOGA JEZERA.....	60
3.4.	OBRADU VREMENSKIH NIZOVA KLIMATOLOŠKIH I HIDROLOŠKIH PODATAKA	62
3.5.	GENERIRANJE VREMENSKIH NIZOVA KLIMATOLOŠKIH PODATAKA DO 2100. GODINE.....	68
3.6.	BILANČNA SAGLEDAVANJA	71
3.7.	METODOLOGIJA INTELIGENTNE ANALIZE PODATAKA	78

3.8.	MODELI NEURONSKIH MREŽA (NN)	83
3.9.	MODELI REGRESIJSKIH STABALA ODLUČIVANJA (RTREE)	99
4.	REZULTATI.....	82
5.	RASPRAVA.....	83
5.1.	ANALIZA KLIMATOLOŠKIH ZNAČAJKI	83
5.2.	ANALIZA DINAMIKE KOLEBANJA RAZINE JEZERA I MORA	87
5.3.	ANALIZE VODNE BILANCE.....	96
5.3.1.	<i>Kontrolirani dotoci i istjecanja.....</i>	<i>96</i>
5.3.2.	<i>Općenita ocjena vodne bilance</i>	<i>102</i>
5.3.3.	<i>Analiza mjesečne vodne balance</i>	<i>111</i>
5.3.4.	<i>Modeliranje i analiza bilance godišnjih dotoka sa sliva Vranskoga jezera na temelju povijesnih podatka i podataka generiranih klimatološkim modelima za razdoblje (1951.-2100.).....</i>	<i>115</i>
5.4.	ANALIZA ZASLANJENOSTI VODE U JEZERU	123
5.5.	HIDROLOŠKE ZNAČAJKE VRANSKOGA JEZERA U REGIONALNIM OKVIRIMA.....	143
5.6.	MODELIRANJE UTJECAJA MOGUĆIH PROMJENA U SUSTAVU VRANSKOG JEZERA NA KOLEBANJE RAZINA I ZASLANJENJE NJегоVIH VODA	152
5.6.1.	<i>Modeliranje kolebanja razine vode u jezeru u postojećim hidrološkim prilikama.....</i>	<i>158</i>
5.6.2.	<i>Modeliranje zaslantjenja vode u jezeru</i>	<i>164</i>
5.6.3.	<i>Modeliranje kolebanja razine vode u jezeru u promijenjenim scenarijima klimatskih prilika</i>	<i>180</i>
6.	ZAKLJUČCI.....	183
7.	LITERATURA.....	191
7.1.	OBJAVLJENI RADOVI	191
7.2.	OSTALA NEOBJAVLJENA DOKUMENTACIJA.....	214

POPIS TABLICA	219
POPIS SLIKA	222
ŽIVOTOPIS.....	228
POPIS OBJAVLJENIH RADOVA	230

1. UVOD

1.1. Problemski okvir istraživanja

Slatkovodni sustavi površinskih vodotoka i jezera koji se nalaze u Mediteranskoj zoni priobalnoga krša imaju posebnu vrijednost upravo zbog toga što je to površinskim vodnim pojavama uglavnom siromašan prostor. Takvi prirodni sustavi pokazuju slučajna, kaotična i višestruko periodička ponašanja kojima upravljaju kako prirodni utjecaji (gravitacija, putovanje Zemlje po orbiti, vrijeme...), tako i antropogeni poremećaji (Roehl i sur., 2006). Posljedice tih poremećaja mogu ugroziti opstojnost takvih sustava, stoga je upravljanje priobalnim vodonosnicima i jezerima jedan od najvećih suvremenih vodnogospodarskih izazova na području Mediterana, pa i šire. Razlozi tomu su brojni. S jedne su strane prisutni globalni procesi litoralizacije i s njima povezani negativni antropogeni utjecaji i povećanje pritiska na vodne zalihe. S druge strane zapažaju se promjene prirodnih značajki, odnosno klimatskih utjecaja, kao što je opći trend povećanja temperature zraka i s njim povezano povećanje razine mora uz istovremeno smanjenje količine oborina. To utječe i na smanjenje bilance otjecanja iz sliva, a pritom su posebno ugroženi priobalni krški vodonosnici. Na značajnom dijelu mediteranskoga priobalnog područja upravo su zato prisutni problemi prodiranja zaslanjenih voda u dublje dijelove priobalnih krških vodonosnika (Custodio i Bruggeman, 1982; Benblidia i sur., 1996; Custodio, 2002; Mediterranean Groundwater Working Group, 2007). Plitka priobalna jezera na Mediteranu također su sustavi posebno osjetljivi na globalne klimatske promjene te imaju iznimno značenje za očuvanje bioraznolikosti (Sanchez i sur., 2004; Beklioglu i sur., 2007).

Stoga, kako količina vode i problemi njezine kakvoće postaju sve ozbiljniji, točnost predviđanja i djelotvornost upravljanja ograničenim vodenim resursima postat će kritični (Coppola i sur., 2003). Naime, krške se sustave i vodonosnike za sada promatra i determinira uglavnom kao statičke sustave sa značajkama koje su imali u prošlom i sadašnjem vremenskom razdoblju. No, za razumijevanje njihova djelovanja, za njihovu zaštitu kao i za predviđanje njihova ponašanja u izmijenjenim rubnim uvjetima, vodne je resurse na konceptualnoj razini sagledavanja nužno analizirati kao dinamičke sustave – u kontinuitetu razvoja klimatskih i hidroloških procesa i promjena koje oni nose. Promjene u hidrološkome režimu, posebice pri pojavama dugotrajnih suša u toplome dijelu godine, imaju naglašen utjecaj na biologiju jezera, odnosno na dinamiku rasta, vrijeme i reprodukciju (posebice kod plitkih jezera), na procese fotosinteze te stupanj mineralizacije (Coops i sur., 2003; Beklioglu i sur., 2007).

Odavno su prepoznate gospodarske vrijednosti pojedinih takvih sustava, a njihovo je korištenje uvjetovalo promjene prirodnih značajki, ali i povećalo rizike njihove opstojnosti u sadašnjosti i budućnosti, pogotovo u kontekstu mogućih klimatskih promjena/varijacija koje se predviđaju do kraja 21. stoljeća. Procijenjeni negativni utjecaj klimatskih promjena očituje se u dostupnosti svjetske zalihe slatkih voda, kakvoći i smanjenju vodnoga potencijala. Pored toga, mogući negativni utjecaji na slatkovodne sustave te one s njima povezane, uključujući slatkovodne ekosustave, imat će i snažne socijalno-ekonomske utjecaje (Kundzewicz i sur., 2007, 2008).

U ovom se doktorskom radu, na primjeru negativnih utjecaja prisutnih procesa u priobalnim krškim područjima – plitkom priobalnom Vranskom jezeru u Dalmaciji, analizira vodni režim takvih jezerskih sustava te mogući utjecaj očekivanih klimatskih promjena/varijacija na njegove promjene. Budući da u krškim sredinama prevladava

podzemna komponenta otjecanja, površinske su vodne pojave, a naročito jezera, mnogo rjeđe zastupljena. Takvi su krški slatkovodni sustavi osjetljiviji i na negativne utjecaje antropogenih i klimatskih promjena/varijacija (smanjenje raspoloživih količina voda i ugrožavanje kakvoće, ponajviše uslijed povećanja zaslanjenosti slatkih voda). To se posebno odnosi na slatkovodne sustave u neposrednom dodiru s morem.

U ovome je doktorskome radu postavljen konceptualni hidrološki model Vranskoga jezera, analiziran njegov vodni režim tijekom raspoloživoga razdoblja motrenja i mjerenja osnovnih klimatoloških i hidroloških veličina te su dane procjene mogućih promjena u slučajevima daljnjih mijenjanja hidroloških prilika, što je najneposrednija posljedica moguće promjene klimatskih prilika/varijacija. Dominantan utjecaj na hidrološke procese imaju izražena krška obilježja toga prostora. Ona uvjetuju i složenost vodnih sustava razvijenih na tom prostoru, stoga je poseban naglasak upravo na unapređenju metoda hidroloških istraživanja priobalnih krških jezera. Unapređenje se temelji na metodološkim postavkama vezanim uz tri osnovne dosadašnje faze razvoja znanstvenih metoda istraživanja – od metoda opažanja i analitičkih metoda do recentnih sustavnih metoda kao što je primjena metoda umjetne inteligencije (*AI*). Pritom sve spomenute grupe metoda imaju mjesto u cjelovitom pristupu istraživanjima vodnih resursa. Posebno doprinose istraživanju u krškim sredinama koje odlikuje izrazita prostorna nehomogenost, kao i nelinearnost međuodnosa utjecajnih karakterističnih parametara.

Možda je najbolja definicija razmatranoga problemskog okvira dana u radu Roehla i sur. (2006) prema kojem se upravljači i korisnici prirodnih resursa često suočavaju s dva izazovna problema. Prvi je predviđanje budućih uvjeta za optimalnu raspodjelu vodnih količina. Ovdje se prirodni sustav sastoji od vremena (meteoroloških uvjeta) i o njemu ovisnoga hidrološkog sustava vodnih zaliha. Drugi

je problem prognoza ponašanja kombiniranih prirodnih i umjetnih sustava koji također uključuju antropogene utjecaje korisnika vodnih zaliha.

Radna hipoteza ovog doktorskog rada je da se posljedice klimatskih promjena i/ili njihovih varijacija zapažaju već i na sadašnjoj vremenskoj skali pri čemu su posebno ugrožene priobalne vodne rezerve u kršu. Terminološka dvojnost u pojmu klimatske promjene/varijacije prisutna je zato što, iako velika većina autora i institucija koje se bave istraživanjem klime i klimatskih utjecaja drži da prisutne klimatološke značajke imaju osobine trenda s trajnim i nepovratnim promjenama uvjetovanih prije svega nepovoljnim antropogenim utjecajima, dio istraživača ipak smatra da se radi o povratnim procesima, odnosno uobičajenim klimatskim varijacijama koje su se i do sada, neovisno o prisutnim antropogenim utjecajima, očitovale u dužem vremenskom periodu. Kako se ovaj doktorski rad ne bavi istraživanjem uzroka recentnih klimatskih utjecaja, već mogućim posljedicama u duljem, ali ograničenom vremenskom razdoblju do 2100., zadržana je i terminološka dvojnost.

U slučaju nastavka zapaženih klimatskih promjena/varijacija i ostvarenja njihovih projekcija do kraja 21. stoljeća, rizik od negativnih posljedica takvih izmijenjenih prilika bit će dodatno povećan. U tom je smislu u danom doktorskom radu na primjeru Vranskoga jezera u Dalmaciji dokazano prisustvo rizika povećanih zaslanjenja njegova jezerskoga sustava uslijed prisutnih postojećih klimatskih utjecaja i u uvjetima projekcija daljnjih klimatskih promjena, kao i uslijed utjecaja postojećih antropogenih zahvata. Prije svega se to odnosi na prokop kanala Prosike kojim je jezero neposredno spojeno s morem, čime je promijenjen režim istjecanja voda iz jezera i u sušnim prilikama omogućeni neposredni prodori zaslanjene morske vode u jezerski sustav.

1.2. Cilj i sadržaj rada

Cilj ovoga doktorskog rada je razvoj i unaprjeđenje metoda hidroloških analiza i modeliranja vodnoga režima jezera u priobalnom kršu, te izrada konceptualnoga modela djelovanja priobalnih krških vodonosnika vezanih uz slatkovodni jezerski sustav i njegovu dinamiku. Pritom je naglasak stavljen na modeliranje utjecaja koje očekivane klimatske promjene mogu imati na takve sustave.

U tom je kontekstu razjašnjen mehanizam funkcioniranja Vranskoga jezera, čija je jedna od specifičnosti i to da se radi o hidrološkom sustavu s nemjerljivim dotocima i istjecanjima iz jezera. Modelirano je ponašanje jezerskoga sustava u postojećim i u pretpostavljenim klimatskim promjenama s izmijenjenim hidrološkim prilikama. Pritom je zanimanje prije svega usmjereno na kvantitativne pokazatelje stanja hidroloških prilika, posebno tijekom kritičnih - sušnih razdoblja. Jedan od ciljeva je da se tako stečena saznanja iskoriste za unaprjeđenje upravljanja Vranskim jezerom kako bi se ono zaštitilo u sadašnjim, kao i u promijenjenim uvjetima.

Doktorski rad sastavljen je od šest osnovnih poglavlja i popisa literature u kojem su dani literaturni izvori, kao i drugi dokumenti koji su korišteni prilikom izrade rada.

Poglavlje 1. Uvod

U uvodu je dan prikaz problemskoga okvira istraživanja, cilja i sadržaja rada, te najvažniji rezultati prethodnih istraživanja na kojima se doktorski rad temelji.

Poglavlje 2. Polazišta

U ovom se poglavlju daje pregled raspoloživih, literaturnih saznanja o klimatskim promjenama/varijacijama na širem regionalnom prostoru, te njihov utjecaj na vodne sustave u kršu. Daje se i pregled saznanja o priobalnim vodnim

sustavima u kršu s modelima njihova zaslanjivanja i konceptualnim načinima provedbe zaštite. Poglavlje sadrži polazne osnove – saznanja o Vranskom jezeru na koja se nastavlja rad u ovom doktorskom radu, kao i konceptualni model analiziranoga jezerskog sustava.

Poglavlje 3. Materijali i metodologija istraživanja

Ovo poglavlje sadrži opis primijenjenih metoda istraživanja – počevši od statističkih metoda pa do metoda modeliranja. Pritom je naglasak stavljen na dva tipa modela iz domene metoda tzv. dubinskoga/strojnog učenja, odnosno primjene metoda umjetne inteligencije (AI) – neuronske mreže (NN) i regresijska stabla odlučivanja (RTREE).

Poglavlje 4. Rezultati

U ovom poglavlju daje se poveznica između dobivenih rezultata i njihove rasprave. Rezultati su dobiveni kako na temelju provedenih standardnih hidroloških analiza, tako i na temelju korištenja specifičnih modela. Sve ovo vezano je uz korištene raspoložive vremenske nizove opaženih povijesnih podataka i analiziranu geometriju jezerskoga prostora.

Poglavlje 5. Rasprava

U ovom poglavlju provedena je rasprava o dobivenim rezultatima. Kako bi se ocijenio utjecaj mogućih promjena na hidrološko stanje u jezeru i promjenu njegove zaslanjenosti, rezultati su uključeni i u modeliranja stanja jezerskog sustava u izmijenjenim okolnostima.

Poglavlje 6. Zaključci

Uz općenite zaključke temeljene na dobivenim rezultatima i provedenoj raspravi, u ovom su poglavlju dane i preporuke za daljnja istraživanja.

1.3. Rezultati prethodnih istraživanja

Istraživanja hidrološkoga režima vodnih resursa u kršu i utjecaja klimatskih promjena/varijacija na njih, spadaju u red aktualnijih područja znanstvenoga interesa, prije svega zbog mogućih neželjenih posljedica u skoroj budućnosti. Naime, krške vodonosnike karakterizira proces evolucije koji se odvija u različitim vremenskim skalama, a opažene značajke samo su trenutna slika sustava u stalnoj mijeni. Uzroci tih promjena vezani su za razvoj i dinamiku procesa u krškim strukturama, ali i klimatološke promjene i varijacije koje pak imaju posljedice na režim otjecanja površinskih i podzemnih voda. Prema Whiteu (2002), krška hidrologija zahtijeva složen pristup te objedinjuje i koncept površinskih voda i koncept podzemnih voda, a u kontekstu analizirane tematike i koncept klimatoloških prilika koje definiraju rubne uvjete planiranih istraživanja.

Temeljnu literaturu na koju se ovaj doktorski rad tematski i metodološki naslanja čine djela iz nekoliko znanstveno-istraživačkih područja:

- **Hidrologije krša**, posebno hidrologija jezera, upravljanje priobalnim vodnim resursima i modeliranje/ocjena klimatskih promjena:

Prilikom konceptualizacije modela djelovanja krškoga vodonosnika i njegovoj povezanosti s jezerskim sustavom te analiza vodnoga režima koriste se pristupi dani po Crochetu i Marsaudu (1997). Prema njima se, počev od identifikacije i demonstracije krškoga sustava, dolazi do prognostičkoga koraka, odnosno do izrade konceptualnoga modela sustava i procjene njegova vodnog režima. Pritom su provedena istraživanja vezana za metodološke pristupe sljedećih autora: Maillet-a (1905), Wintera (1976, 1981), Lermana i sur. (1995), Bonaccija (1987), Forda i Williamsa (1989, 2007), Beara i Verruijta (1994), Bakalowicza (2001, 2005),

Tallaksen i Van Lanena (2004), Goldscheidera i Drewa (2007), Krešića (2009) te Krešića i Stevanovića (2010). Buduće i prošle klimatske promjene/varijacije i njihovi mogući utjecaji posebna su komponenta hidroloških sagledavanja. Što se tiče zapaženih globalnih klimatskih promjena, u danom se doktorskom radu oslanjaju na radove Bradleya i Jonesa (1995), Bollea (2003), IPPC (2007), Kundzewicza i sur. (2007). Procjena klimatskih promjena u 21. stoljeću temelji se na rezultatima modelskih procjena (DHMZ, 2011) danim po modelima Aladin (Bubnova i sur., 1995), Promes (Castro i sur., 1993) te RegCM3 (Pal i sur., 2007). Značajke zapaženoga općenitog trenda povećanja razine mora na širem su regionalnom prostoru analizirane u radovima Pirazzolija (2000, 2005), Lambecka i sur. (2004), te Lambecka i Purcella (2005).

- Primjene modelskih pristupa:

Modeliranja ponašanja jezerskoga sustava provedena su na temelju iskustvenih regresijskih modela koji čine osnovni pristup takvih modeliranja (Beven, 2003), kao i naprednim tehnikama modeliranja. To su, primjerice, metode primjene umjetne inteligencije (Han i Kamber, 2001; Larose, 2006; Hall i sur., 2009), posebno modeli vezani uz područje primjene neuronskih mreža (Abrahart i sur., 2004), kao i modeli vezani za područje klasifikacijskih pravila te regresijskih stabala (Witten i Frank, 2000).

- Dosadašnjih spoznaja o istraživanom prostoru Vranskoga jezera, te hidrološkim i drugim značajkama širih regionalnih prostora:

Prvi, putopisni, opis Vranskoga jezera u Dalmaciji dao je Fortis još 1774. godine. Taj je prijevod na hrvatski jezik poznat iz puno kasnijeg izdanja (Fortis,

1984), a u njemu su zabilježeni i vrlo vrijedni podaci o prokopu kanala Prosika koje je proveo Borelli 1770. Krajem 19. i početkom 20. stoljeća Vransko jezero zainteresiralo je i Gavazzija (1889, 1904). Hidrogeologiju ovog prostora i jezerskoga sustava istraživali su Fritz (1978, 1984), Kapelj J. i sur. (2003) te Kapelj S. i sur. (2008), a hidrologiju Beraković (1983) i Švonja (2003). Kolebanja razine mora i njihove trendove na istočnoj obali Jadrana analizirali su Šegota (1968), Orlić i Pasarić (1994), Orlić (1995) te Čupić i sur. (2011). O klimatološkim procjenama prisutnih trendova, kao i o mogućim daljnjim klimatskim promjenama govore radovi Gajić-Čapke i Zaninović (2006), Bonaccija (2010) te Gajić-Čapke i sur. (2011). U ovome doktorskom radu korišteni su i rezultati regionalnih hidroloških analiza koje su dali Stepinac (1969), Žugaj (1995), Petrićec i sur. (2011), kao i saznanja o hidrologiji Dinarskoga krša i o zaslanjenjima priobalnih krških izvora i vodonosnika (Breznik, 1973, 1998; Bonacci, 1987; Bonacci i Roje-Bonacci, 2004).

- **Dosadašnjih rezultata vlastitih istraživanja** u kojima je neposredno sudjelovao autor ovoga dokorskog rada:

Hidrologija priobalnih vodnih resursa i mehanizmi njihova zaslanjenja obrađeni su u radu Rubinića (2007), a hidrologija jezerskih sustava (Vransko jezero na otoku Cresu, Ponikve na otoku Krku te akumulacija Boljunčica u Istri) obrađena je u radovima Rubinića i Ožanić (1992, 1998), Ožanić i Rubinića (1994, 1995) te Bonaccija i Rubinića (2009). Unapređenje metodologije bilanciranja krških slivova na osnovi Turcovoga i Langbeinovog pristupa donosi se u radu Horvat i Rubinić (2006). Doktorski rad naslanja se i na međunarodni EU projekt CCWaterS u kojem su, na temelju ovdje sadržanih metodoloških postavki, provedena modeliranja utjecaja klimatskih promjena na vodoopskrbu za odabrana pilot područja u Hrvatskoj (Rubinić i sur., 2011a, 2011b, 2011c, 2011d).

Rezultati istraživanja provedenih na prostoru Vranskoga jezera (Katalinić i sur., 2007, 2008; Rubinić i sur., 2010a, 2010b) govore u prilog iznimnoj osjetljivosti Vranskoga jezera na nepovoljne hidrološke prilike. Pokazalo se da postoje veliki rizici ugrožavanja daljnje opstojnosti jezera kao slatkovodnoga sustava, ukoliko se nastave dosadašnji negativni trendovi hoda oborina i temperature, dotoka u jezero te kolebanja razine jezera i mora. Posebno je značajan i rad Rubinića i Katalinić (2014) u kojem su predstavljene osnovne postavke i rezultati istraživanja vezanih uz ovaj doktorski rad. Pritom je autorski udio Rubinića vezan uz hidrologiju Vranskog jezera i procjene mogućeg utjecaja klimatskih promjena/varijacija na njegov vodni režim, a autorski udio Katalinić vezan uz biološke ocjene stanja i utjecaja mogućih promjena na jezerski ekosustav.

2. POLAZIŠTA

2.1. Opće značajke priobalnih krških vodonosnika i vodnih sustava

Krš kakav znamo i izučavamo, rezultat je dinamičkih procesa u tijeku, a koji traju od stvaranja krških stijena do njihova nestanka (Grabovšek, 2000). Osnovna značajka vodnih resursa u kršu upravo je njihova promjenjivost – podložnost promjenama vezanima uz procese promjene rubnih uvjeta, u svim komponentama njihove pojavnosti i na različitim vremenskim skalama. Čovjek svojim aktivnostima i potrebama značajno zadire u hidrološki ciklus vodnih pojava u kršu te dodatno utječe na njihovu dinamiku. Prema Atkinsonu (1986) krške se pojave razvijaju u lakotopivim sedimentnim stijenama kao što su evaporitne karbonatne stijene. Istraživano područje odlikuje se krškim pojavama nastalima u različitim litološkim varijetetima vapnenaca: dolomitnim vapnencima, dolomitima i karbonatnim brečama (Fritz, 1978, 1984; Kapelj S., 2008). Unutar takve stijenske mase prostiru se krški vodonosnici. Struktura tih krških vodonosnika uvjetuje pravce i dinamiku kretanja podzemnih voda, pri čemu tektonika ima naglašenu ulogu u ostvarivanju povezanih pukotinskih sustava kao inicijalnih privilegiranih pravaca kretanja podzemnih voda. Dijelove površinskih slivova i vodonosnika krških hidroloških sustava odlikuje velik stupanj međuzavisnosti, kao i velik stupanj osjetljivosti na vanjske, posebno antropogene utjecaje.

U širem kontekstu, posebno onom vodnogospodarskom, krške sustave obuhvaćaju i nekrška područja neposredno locirana uz zone topivih stijena, a koja imaju utjecaj na režim cirkulacije i zadržavanja voda u zonama topivih stijena. Takvom sagledavanju odgovara i Bakalowicz-ev (2004) generalni konceptualni model

krških vodnosnika, koji je uz manje autorove dopune vezane uz međudnose u krškim priobalnim sustavima prikazan na slici 2.1.

Prema tom konceptu, tečenje voda na krškim se područjima može podijeliti na tečenja kroz dva režima - podsustave površinskih voda i podsustave podzemnih voda. Oni u pravilu djeluju zajedno, ali se mogu razmatrati i razdvojeno. Podsustav površinskih tokova sastoji se od dvije komponente. Prva od njih su vodotoci koji predstavljaju dotoke voda iz nekrškog susjednog okruženja, a završavaju u ponorskim zonama te tako u neposrednom dodiru s krškom zonom predstavljaju točke brzoga koncentriranog utoka u krške vodonosnike. Drugi je način prihranjivanja putem oborina koje se kroz sva krška područja, odnosno kroz njegove gornje slojeve (tlo i epikršku zonu), neposredno infiltriraju u podzemlje na disperzan i uglavnom usporen način. Dio palih oborinska voda koji se ne može procijediti kroz tlo otječe površinski, a dio se utroši na evapotranspiraciju. Pod time se podrazumijevaju svi procesi pomoću kojih se voda koja se nalazi na tlu ili u blizini površine tla u tekućem ili krutom stanju transformira u plinovito stanje (Dingman, 1994).

Slika 2.1.

Slika 2.1. Generalni konceptualni model prihranjivanja i djelovanja pojedinih dijelova krškog vodonosnika - dopunjeno prema Bakalowicz-u (2004)

Podzemno tečenje sadržava dvije komponente tečenja – nezasićenu (vadoznu) zonu koja se sastoji od gornje epikrške i donje vadozne zone, te najdonju - zasićenu (freatičku) zonu. Epikrš je dio prostora krša s vrlo raspucanim, ali nerijetko i glinovitim taložinama djelomično ispunjenim pukotinskim strukturama. One

uobičajene brze vertikalne tokove podzemnih voda dijelom usporavaju, te tako mogu i dominantno utjecati na režim tečenja podzemnih voda (Trček, 2003). Donja vadozna zona sastoji se od sloja stijena u kojima se voda uglavnom ne zadržava već vertikalno teče do razine podzemnih voda (Bonacci i Roje-Bonacci, 2004), odnosno do stalno saturirane freatičke zone. Freatičku zonu obilježava mreža krških kanala s vrlo velikom hidrauličkom provodljivošću i zone akumuliranja podzemne vode u manje vodljivim dijelovima stijenskih blokova. Njihova je gornja granica razina podzemnih voda (Šušтариć, 1999), a donja vodonepropusniji slojevi. U freatičnoj su zoni procesi okršavanja, tj. širenja pukotina uslijed agresivnoga korozivnog i erozijskog djelovanja vode, najbrži. Zbog toga se tijekom morfogeneze krškoga područja, odnosno razvojem procesa okršavanja povećava hidraulička provodljivost razvijenih sustava podzemnih kanala, snižava razina podzemnih voda te tako postupno spušta i razina karstifikacije (Grabrovšek, 2000; Deybrodt i Grabrovšek, 2002; White, 2002; Ford i Williams, 2007).

Na istoj, geološkoj vremenskoj skali, ti su procesi istovremeno praćeni i globalnim klimatskim promjenama/varijacijama. Klimatske promjene/varijacije se odražavaju u globalnim promjenama morske razine koja je zapravo najniža drenažna baza slobodnog istjecanja podzemnih voda. Podizanjem razine mora tijekom posljednje oledbe, niži dijelovi okršenih stijena poplavljuju se morem (Juračić i Surić, 2010), što usporava otjecanje iz prethodno oblikovanih krških drenažnih sustava. Smanjuju se brzine tečenja u donjim dijelovima krških vodonosnika čime se mijenjaju i uvjeti taloženja sedimenata u krškim vodonosnicima i njihovu priobalnom okruženju. Ujedno se na rubnim priobalnim dijelovima krških vodonosnika stvara ravnoteža između slanih i slatkih voda na principima hidrostatskoga Ghyben - Herzbergovog zakona (slika 2.2.) do kojeg su spomenuti istraživači nezavisno došli (Bonacci, 1987).

Slika 2.2.

Slika 2.2. Ravnoteža slane i slatke vode u priobalnim vodonosnicima u skladu s Ghyben – Herzbergovim hidrostatskim zakonom - prema Verruijtu (1968)

Postavke na kojima počiva Ghyben-Herzbergov zakon (slana voda u stanju mirovanja, tečenje bez miješanja slatke i slane vode) mogu se prihvatiti samo ako je režim kretanja slatke vode stacionaran, s malim brzinama reda do $5 * 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$. To se može postići samo kod intergranularnih vodonosnika s pretežno subkapilarnim porama, gdje se stvarno kontaktna površina između slatke i slane vode svodi na zonu miješanja širine oko 1 m. U stvarnosti, pogotovo u krškim strukturama sa sekundarnom poroznošću, zona miješanja je daleko šira i, vrlo često zonarna zbog lokalnih uvjeta.

No, uvažavajući hidrodinamičke uvjete tečenja voda u priobalnom homogenom vodonosniku, Verrujit (preuzeto iz Mayer, 1993) definirao je položaj granice slane i slatke vode prema slijedećim izrazima:

$$h_f = \sqrt{\frac{2\beta Q}{K(1+\beta)}} x \quad (\text{m}) \quad h_s = -\sqrt{\frac{Q^2}{\beta^2 K^2} \frac{1-\beta}{1+\beta} \frac{2Qx}{\beta K(1+\beta)}} \quad (\text{m}) \quad (2-2)$$

gdje su:

x – udaljenost od obalne linije (m)

Q – dotok slatke vode u more po jedinici širine vodonosnoga sloja ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

K – koeficijent hidrauličke provodljivosti vodonosnog sloja (ms^{-1})

1)

$$\beta - \text{faktor ovisan o gustoći vode } (\beta = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \approx 0,025)$$

U prirodnim uvjetima kod krških je vodonosnika prisutna značajna nehomogenost koja uvjetuje još složenije kretanje podzemnih voda i mora, pri čemu naglašenu važnost imaju tečenja kroz privilegirane pukotinske sustave, odnosno podzemne kolektore većih dimenzija (slike 2.3.–2.4.). Ovisno o hidrološkim i hidrauličkim značajkama u pojedinim dijelovima vodonosnika, te o geometriji kanalskih sustava, u pojedinim se slučajevima javljaju istjecanja podzemnih voda i ispod razine mora. Isto tako, o položaju kanalskih kolektorskih sustava u odnosu na granice slane i slatke vode (zonu miješanja), ovisi ne samo režim istjecanja podzemnih voda, već i stupanj njihova zasljenjenja, a koji se obično mijenja u različitim hidrološkim prilikama. Često su dovoljna samo uobičajena dnevna kolebanja razine mora da se kao reakcija priobalnoga krškog vodonosnika javljaju i vrlo velike promjene saliniteta podzemne vode na mjestu njezina istjecanja.

U krškim priobalnim vodonosnicima koji imaju razvijenu mrežu provodnika većih dimenzija, postoje dvije vrste toka i brzina voda: brza komponenta tečenja u kolektorskim pukotinskim sustavima te spora filtracijska tečenja unutar stijenskih blokova sa samo primarnom poroznošću. Ako postoji značajno zaleđe s osiguranim prilivom podzemnih voda pri dugotrajnim ustaljenim hidrološkim prilikama u sušnim razdobljima ipak dolazi do uravnoteženja stanja unutar vodonosnika (slika 2.3.). Tijekom takvih razdoblja može se pretpostaviti da se granice između slatke, bočate i slane vode donekle stabiliziraju i variraju ovisno o dnevnim amplitudama mijena

plime i oseke i stupnju njihova prigušenja u dubini vodonosnika. Na slici 2.3. vidljivo je da u takvoj situaciji slatke vode imaju dovoljan tlak da drže stabilnom formiranu slatkovodnu leću te da drže ravnotežu s bočatim i slanim vodama u dijelovima vodonosnika koji su izloženiji utjecaju mora koje cirkulira u dubljim dijelovima vodonosnika. Ukoliko sušne prilike dulje potraju, slatkovodna se leća postupno stanjuje, što slabljenjem tlaka slatke vode omogućava da eventualno i bočate vode istječu kroz prikazani priobalni izvor.

Slika 2.3.

Slika 2.3. Shematski prikaz cirkulacije podzemnih voda u priobalnom krškom vodonosniku uz pretpostavku postojanja formirane stabilne vodne leće tijekom dugotrajnijih sušnih razdoblja (Rubinić, 2007)

U takvim se sustavima nagle promjene zbog intenzivnijih oborina i njima izazvanih većih dotoka slatkih voda manifestiraju i naglim promjenama hidrauličkih uvjeta (Rubinić, 2007), kao i narušavanjem ravnoteže prikazane na slici 2.3. Promjene ravnoteže očituju se bržim prodorima slatke vode kroz pojedine krške kolektore većih dimenzija mjestimično položenih i ispod bočate vode. Ovisno o hidrološko-hidrauličkim prilikama u podzemlju, u tim situacijama dolazi do učinka potiskivanja slanih voda u smjeru najmanjega hidrauličkog otpora, a često je to upravo kroz ranije ostvareni slatkovodni dio vodne leće. Najčešće je to upravo sam krški izvor koji nakon dugotrajnoga sušnog razdoblja u početnom razdoblju nastupa takvih velikih voda izbacuje iz svoga sustava vodonosnika zaslanjenu vodu (slika 2.4.).

Slika 2.4.

Slika 2.4. Shematski prikaz cirkulacije podzemnih voda u priobalnom krškom vodonosniku u uvjetima nagloga dotoka većih voda nakon dugotrajnoga sušnog razdoblja (Rubinić, 2007)

U tim prilikama granice između slane, bočate i slatke vode uglavnom nisu jednoznačno razlučive niti čvrste. Općenito, zona slatkih voda se proširuje i nadvisuje, pa ona u tim uvjetima naglo potiskuje bočate i zaslanjene vode. Dio zaslanjenih voda se u dubljim dijelovima vodonosnika uspijeva potisnuti kroz razvijene pukotinske i porne sustave u jednom manje-više izraženom frontu prema moru. No, dio bočatih voda zarobljenih u vodonosniku koje se tim putem ne uspijevaju potisnuti znade biti istisnut i u suprotnom smjeru - kroz zonu istjecanja samoga priobalnoga izvora uzrokujući tako povećanje saliniteta njegovih voda. Prilikom takvih povećanih dotoka obično se aktiviraju i povremeni izvori koji imaju više kote istjecanja, a povećava se i izdašnost priobalnih vrulja.

Pritjecanje velikih količina slatkih voda u priobalnu vodnu leću nakon te početne „burne“ faze razbijanja ranije dinamičke ravnoteže prati i proces uspostave nove ravnoteže. Taj proces obilježavaju veća nadvišenja slatkih voda i postupni proces potiskivanja zaslanjenih voda k moru i rubnim dijelovima krških vodonosnika, kako u privilegiranim krškim provodnicima, tako i unutar blokova u stijenskoj masi. Time se stvara stabilni slatkovodni nadsloj ostvarene vodne leće, unutar koga se dalje odvija proces pražnjenja slatkih podzemnih voda kroz krški priobalni izvor (slika 2.5.).

Prikazani mehanizam zaslanjivanja i oslađivanja voda priobalnih izvora nije i jedini mogući scenarij međuodnosa slatkih i slanih voda u priobalnom vodonosniku. Najčešći su slučaj priobalna izvorišta i vodonosnici koji djeluju na uobičajeni način – povećani dotoci slatkih voda imaju za posljedicu „oslađivanje“ njihovih vodonosnika, odnosno postupno potiskivanje granice dodira slatke i slane vode k moru i veću debljinu slatkovodne leće. Na samim se izvorima pri naglom nailasku većih dotoka ne zapaža opisano izbacivanje zarobljenih „džepova“ slane vode. Pogotovo se to odnosi na izvorišta i vodonosnike kod kojih je donji dio vodonosnika vezan uz vodonepropusnije geološke strukture. One, naime, onemogućuju da tijekom sušnijih razdoblja i istanjivanja slatkovodne leće dolazi do podvlačenja zaslanjenih voda dublje u aktivni dio njihovih vodonosnika.

U nekim slučajevima donji dijelovi krškoga priobalnog vodonosnika ne moraju biti izgrađeni od različite geološke strukture da bi imali funkciju razmjerno vododržive barijere prema prodoru klina morske vode u aktivni dio vodonosnika. Poznato je da se uslijed promjena razina mora mijenjala i razina okršavanja, te je posljednjom transgresijom morske razine došlo do potapanja ranije okršenih zona. Promatrajući u geološkim razmjerima vremena, promjenom hidrauličkih prilika uslijed djelovanja uspora mora pri puno višim kotama u odnosu na nekadašnju razinu okršavanja, dolazi do smanjenja brzina, a time i strujanja voda u dubljim dijelovima vodonosnika. To za posljedicu ima i intenzivnije procese taloženja suspendiranoga nanosa u takvim zonama. Time se, usporedno s procesima okršavanja koji su puno sporiji, otješnjaju ranije razvijeni pukotinsko-kavernozni sustavi, te se smanjuje intenzitet miješanja slatkih i slanih voda u tim rubnim dijelovima vodonosnika.

Slika 2.5.

Slika 2.5. Shematski prikaz cirkulacije podzemnih voda u priobalnom krškom vodonosniku u uvjetima stabilizacije novoga stanja ravnoteže slatkih i slanih voda nakon prolaska prve faze nailaska većih voda (Rubinić, 2007)

Postoje priobalna izvorišta kod kojih se u uvjetima povećanih dotoka ne može uspostaviti stabilna ravnoteža slatkih i slanih voda, tako da se kod toga tipa izvora najmanja zaslanjenja zapažaju tijekom najmanjih protoka. Isto tako, postoje i suprotni slučajevi priobalnih izvorišta koji, unatoč niskoj koti istjecanja u odnosu na razinu mora, imaju dobru hidrogeološku prepreku od prodora mora u aktivne dijelove njihova vodonosnika i nemaju problema sa zaslanjivanjima. Ukoliko, pak, kod dotoka slatkih podzemnih voda ne postoji dovoljno jako i stabilno krško zaleđe, na priobalnim će izvorima stalno istjecati dijelom zaslanjena voda. Varijacija saliniteta njihovih voda ovisi o hidrološkim prilikama. No, priobalni krški izvori predstavljaju i otvorene puteve za prodore morske vode u dublje dijelove krških vodonosnika, pogotovo u sušnijim hidrološkim prilikama, odnosno kada postoje uvjeti da gradijenti tečenja voda/mora budu usmjereni iz priobalja prema samom krškom vodonosniku.

Poseban je slučaj kada su dijelovi priobalnoga krškog vodonosnika otvoreni tako da stvaraju priobalna jezera. To je slučaj s područjem Vranskog jezera u Dalmaciji koje se istražuje u ovom doktorskom radu. Dinamika funkcioniranja takvih krških vodonosnika i jezera, kao i stupanj povezanosti sa zaslanjenom morskom vodom uvelike je ovisan o hidrološkim prilikama, ali i o hidrauličkim vezama krškoga vodonosnika i jezera s morem. Uz to, poseban utjecaj na kretanje voda imaju i antropogeni utjecaji – hidrotehnički zahvati koji mijenjaju prirodne uvjete otjecanja.

Posljedica tih utjecaja jest da takva priobalna jezera, s velikim stupnjem međuodnosa s morem, čine poseban ekosustav. Ekosustav je biološki i funkcionalni sustav ili cjelina koja omogućuje održavanje života i uključuje sve biotske i abiotske varijable u toj cjelini (Jørgensen i Bendoricchio, 2001). No, promjene u hidrološkom režimu, posebice pri pojavama dugotrajnih suša u toplome dijelu godine, imaju naglašen utjecaj na ekosustav jezera. Utjecaj se očituje na dinamici rasta, vremenu i reprodukciji, osobito kod plitkih jezera, na procesima fotosinteze, te stupnju mineralizacije (Coops i sur., 2003; Beklioglu i sur., 2007). Još se veće promjene u biocenozi jezera zbivaju ako su promjene u hidrološkom režimu praćene i pojavama povećanoga stupnja zaslanjenja jezerske vode uslijed prodora mora u jezerski sustav (Schallenberg i sur., 2003).

2.2. Klimatske promjene/varijacije na širem regionalnom prostoru i njihovo prikazivanje

Predmet izučavanja u ovom doktorskom radu su hidrološke zakonitosti vezane uz vodni režim Vranskoga jezera u Dalmaciji, odnosno zaštita jezera od negativnih utjecaja antropogenih i klimatskih promjena/varijacija. Ove su se promjene/varijacije događale u prošlosti, prisutne su i u sadašnje vrijeme, a predviđaju se i u budućnosti, i to s očekivanim vrlo velikim intenzitetom promjena u vrlo bliskoj budućnosti – do kraja 21. stoljeća. Tako je i proces okršavanja i s njim povezano sadašnje stanje hidroloških značajki otjecanja te povezanosti krškoga vodonosnika, Vranskoga jezera i mora, uvelike ovisan o klimatskim prilikama, odnosno globalnim temperaturama zraka u geološkoj prošlosti (slika 2.6.). Zbog tih je klimatskih promjena, odnosno izmjena hladnijih i toplijih razdoblja, glacijala i interglacijala, dolazilo i do višekratnih promjena razina mora (slika 2.7.), posebno tijekom pleistocena i holocena

(Fleury i sur., 2007). Tijekom glacijala razine mora bile su značajnije niže nego li u sadašnjosti, tijekom zadnjega würmskog glacijala čak i preko 120 m niže od današnje (Pirazzoli, 2000; Antonioli i Silenzi, 2007). Tijekom razdoblja interglacijala razine mora bile su slične današnjima ili neznatno više.

Slika 2.6.

Slika 2.6. Globalne promjene temperature na Zemlji tijekom posljednjih 18 000 god. (Siegert, 2001).

Slika 2.7.

Slika 2.7. Promjene razine Jadranskoga mora tijekom kasnoga pleistocena i holocena (YD – Younger Dryas) (HGI, 2013– modificirano prema Correggiari i sur., 1996)

Klima je podložna periodičnim promjenama i u današnje doba. Sve izrazitija i učestalija pojava dugotrajnih sušnih razdoblja na širem regionalnom prostoru podudara se s globalnim porastom temperature na Zemlji tijekom posljednjih decenija (slika 2.8.). Koliko je taj trend posljedica stvarnih klimatskih promjena, odnosno globalnoga i trajnoga zatopljanja Zemlje uvjetovanoga prekomjernim antropogenim utjecajem, koji prijete globalnim i nesagledivim promjenama uvjeta života na Zemlji, a u kojoj mjeri uobičajeno stanje višegodišnjih klimatskih varijacija, predmet je različitih mišljenja suprotstavljenih timova znanstvenika.

Slika 2.8.

Slika 2.8. Prikaz anomalija godišnjih globalnih temperatura zraka za razdoblje (1850.-2011.), u odnosu na razdoblje (1961.-1990.) (University of East Anglia and Handley Centre, 2012)

Iako postoje značajne razlike u ocjenama mogu li se spomenute skorašnje promjene klime pripisati globalnim klimatskim promjenama ili samo klimatskim varijacijama, dosadašnje projekcije i manifestacije takvih mogućih promjena (Bradley i Jones, 1995; Bolle, 2003; Leroux, 2005; Lionello i sur., 2006; IPCC, 2007; Kundzewicz i sur., 2007, 2008) govore o potrebi da se u gospodarenju vodnim resursima uzima u obzir mogući nastavak, pa i povećanje negativnih trendova klimatskih promjena neovisno o tome radi li se o nepovratnim promjenama ili uobičajenim klimatskim varijacijama. U tome se smislu razmatra i problem skorašnjih klimatskih prilika na istraživanom području Vranskoga jezera u Dalmaciji.

Suvremeni pristupi upravljanju vodnim resursima, posebno kada se radi o zaštićenim područjima, traže razradu različitih scenarija mogućih dugoročnih promjena kako bi se na vrijeme prepoznali rizici te pripremile i optimizirale zaštitne upravljačke mjere. Naime, velik doprinos povećanju rizika od zasljanjivanja priobalnih krških vodonosnika i priobalnih jezera mogla bi dati i prognozirana pogoršanja hidroloških prilika izazvana klimatskim promjenama/varijacijama. To je posebno izraženo zbog povezanosti globalno prisutnih trendova smanjenja protoka (Svensson i sur., 2004) osobito na Mediteranu gdje je istovremeno vrlo značajno poraslo korištenje vode (Cudennec i sur., 2007).

Prema najčešće citiranim izvještajima IPCC-a (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) zagovornika prisutnosti globalnih klimatskih promjena, predviđa se

(slika 2.9.) da bi razina oceana do 2100. mogla porasti između 9 i 88 cm, pri čemu je središnja vrijednost 48 cm (IPCC, 2001). Teorije pojedinih znanstvenika (Douglas i Peltier, 2002) govore pak u prilog tome da procesi podizanja i spuštanja kopna na raznim dijelovima Zemlje nisu uzrokovani globalnim podizanjem razine mora, odnosno da nema potvrde da je porast razina oceana ubrzan tijekom posljednjih desetljeća (Leroux, 2005). Ipak, prevladava mišljenje da raste rizik od globalnoga brzog porasta razine mora (Fairbanks, 1989; Pirazzoli, 2000; Lambeck i sur., 2004; Pirazzoli, 2005; Lambeck i Purcell, 2005; Church i White, 2006; Antonioli i Silenzi, 2007).

Slika 2.9.

Slika 2.9. Prikaz zabilježenog hoda i procjena porasta globalne razine svjetskih oceana
(Antonioli i Silenzi, 2007)

Zanimljivo je povezati globalne trendove i procjene sa stanjem i procjenama vezanim uz regionalni istraživani prostor Jadranskoga priobalja. Tako je i ovdje zapažen globalni trend povećanja srednjih godišnjih temperatura te smanjenja oborina (Zaninović i Gajić-Čapka, 2000; Gajić-Čapka i Zaninović, 2006; Gajić-Čapka i sur., 2011; Bonacci, 2011). To je imalo utjecaj i na prisutne trendove smanjenja protoka na slivovima širega analiziranog područja (Bonacci i Gereš, 2001; Švonja i sur., 2003). Usporedno s tektonski uvjetovanim visinskim pomacima obalne linije, prisutan je i trend podizanja razine Jadranskoga mora. Taj je trend vidljiv kako na geološkoj i povijesnoj vremenskoj skali (Šegota, 1968; Benac i sur., 2004; Faivre i sur., 2006; Surić, 2009; Florido i sur., 2011; Benac i Juračić, 1998), tako i na raspoloživim

mareografskim podacima za istočnu obalu Jadrana (Vilibić, 2003; Orlić, 1995; Orlić i Pasarić, 2000).

U najnovijem radu u kojemu su analizirani podaci o kolebanjima razine mora na istočnoj obali Jadrana za mareografske postaje Rovinj, Split i Dubrovnik (razdoblja obrade 1955.-2009. i 1993.-2009.) utvrđeni su trendovi porasta razine mora (Čupić i sur., 2011). Ustanovilo se da za cjelokupno analizirano razdoblje linearni trend porasta razine mora iznosi 0,45 mm/god za Rovinj, 0,59 mm/god za Split te 0,83 mm/god za Dubrovnik. Za razdoblje od posljednjih sedamnaest godina taj je trend još daleko izraženiji te iznosi 0,91 mm/god za Rovinj, 4,15 mm/god za Split te 3,62 mm/god za Dubrovnik, čime se približava vrijednostima procijenjenima po različitim klimatskim scenarijima.

Promjene morske razine ustanovljene mareografskim mjerenjima na pojedinim se mjestima ne mogu pripisati samo globalnim – glacioeustatičkim promjenama, već na njih utječu i tektonski pomaci Zemljine kore. Na njih važan utjecaj u kraćim vremenskim razdobljima imaju lokalne prilike (tonjenje ili izdizanje terena). Prema današnjim saznanjima, na području sjevernoga i srednjega Jadrana dogodilo se skorašnje tektonsko spuštanje terena (Pirazzoli, 2005), dok je na području južnoga Jadrana uspostavljena ravnoteža između izdizanja kopna i suvremenoga globalnog porasta morske razine (Surić, 2009). Na temelju mjerenja plimskih potkapina u području Kvarnera ustanovljeno je da je tektonsko spuštanje bilo vrlo naglo zbog serije potresa koji su se dogodili u 4. stoljeću nove ere (Benac i sur., 2004, 2008). No, skorašnje promjene razine mora na priobalnom području Vranskoga jezera nije moguće razlučiti s obzirom na njihove uzroke, već one služe za približnu procjenu budućih stanja.

Za ovaj regionalni prostor postoje i različiti scenariji procjene utjecaja promjene klime, između ostaloga i utjecaj na porast razine mora. Zbog toga se razmatraju i načini usporavanja neželjenih procesa, kao i prilagodbe takvim promjenama. Hrvatska je, temeljem odluke Sabora RH o ratifikaciji (NN 55/1996) u svezi s tim preuzela obveze Okvirne konvencije Ujedinjenih naroda o promjeni klime 1996. godine te donijela Prvo nacionalno izvješće Republike Hrvatske prema Okvirnoj konvenciji Ujedinjenih naroda o promjeni klime /UNFCCC/ (Ministarstvo zaštite okoliša i prostornoga uređenja, 2001). U tom dokumentu izborni scenariji klimatskih promjena za Hrvatsku izrađeni su temeljem dvaju globalnih izbornih scenarija IPCC-a (*International Panel on Climate Change*), te na osnovi njih razvijenoga regionalnog klimatskog scenarija za područje Mediterana, razrađenoga na Sveučilištu «East Anglija» u Velikoj Britaniji. Prema oba scenarija, od kojih je scenarij 1992a na donjoj granici očekivanih promjena, a scenarij 1992e na gornjoj granici, unutar odabranih vremenskih razdoblja do 2030., 2050. i 2100. predviđaju se porasti razine mora u rasponu od početnih 20 cm (za 2030.) do 80 cm (za 2100.). Slični rezultati dobiveni su i u okviru ranijega pilot-projekta „Utjecaj predviđenih globalnih promjena klime na otočje Cres-Lošinj“ (Ministarstvo graditeljstva i zaštite okoliša, Odjel za Jadran, 1993) u okviru analize scenarija klimatskih promjena za otočje Cres – Lošinj. Prema njemu se do 2030. predviđa porast razine mora za +18 +/- 12 cm, do 2050. za +38 +/- 14 cm, te se do 2100.g. predviđa ukupni porast razine mora za +65 +/- 35 cm.

U regionalnoj prostorno-vremenskoj skali, osim generalnih trendova hoda karakterističnih pokazatelja klimatskih i hidroloških prilika, uključujući i kolebanja razine mora, naglašen utjecaj na hidrološko stanje imaju lokalni antropogeni pritisci vezani uz različita tehnička rješenja i različite vidove korištenja voda u postojećem

stanju, a posebno u budućnosti. Osobito se to odnosi na hidrotehničke zahvate kojima se mijenjaju rubni uvjeti otjecanja i na zahvate vezane uz korištenje voda, prije svega za navodnjavanje i vodoopskrbu. Iako je na širem priobalnom području istočne obale Jadrana navodnjavanje slabo prisutno, u slivu analiziranoga područja Vranskoga jezera ono je ipak u nešto većoj mjeri zastupljeno, a planirano je i njegovo povećanje (IGH PC Zagreb, 2013). Naime, upravo zbog očekivanih klimatskih promjena/varijacija, Mediteran je istaknuto kao područje u kojemu je nužan razvoj navodnjavanja (De Wrachien, 2004). No, procesi litoralizacije i povećani zahtjevi za korištenjem vodnih zaliha povezani s tim dovode do pojava precrcpljivanja priobalnih krških vodonosnika, pa i zaslanjenja (slika 2.10.). Stoga postoji realna bojazan da bi se u budućnosti negativni procesi prodora mora u priobalne vodonosnike mogli još i značajnije proširiti i intenzivirati.

Slika 2.10.

Slika 2.10. Značajniji prodori mora u priobalne vodonosnike Mediterana (izvor karte - ustupljeno od Gabrić I.)

2.3. Osnovne značajke Vranskoga jezera i njegova sliva

Vransko jezero kod Biograda je osebujno po svojim prirodnim značajkama, a površinom od oko 31 km² i najveće slatkovodno jezero na području Hrvatske. Smješteno je u središnjem priobalnom dijelu istočne obale Jadrana, u neposrednoj blizini mora od kojega ga dijeli uski i oko 10 km dug vapnenački greben širine mjestimično i manje od 1 km (slika 2.11.). Ono je kriptodepresija s dnom na koti od oko 3,5 m ispod razine mora. Razina vode varira u rasponu od oko -0,16 do 2,24 m n. m. Kako je jezero vrlo plitko, njegov se volumen, u okviru spomenutoga raspona

zapaženih vodostaja, kreće u vrlo širokim granicama između 50,3 i 120,3 $\cdot 10^6$ m³. Pri srednjoj razini vode od 0,82 m n. m. volumen jezera iznosi oko 75 $\cdot 10^6$ m³, a površina 31,1 km². Radi se o posebno složenom hidrološkom sustavu s dijelom nekontroliranim dotocima i istjecanjima iz jezerskoga sustava i njegova krškog vodonosnika, a koji je u dinamičkoj ravnoteži s morem.

Slika 2.11.

Slika 2.11. Vransko jezero a) Jezero i priobalje s otocima, b) Priobalni prostor Vranskoga jezera koji predstavlja idealno stanište za velik broj bioloških vrsta (izvor fotografije – arhiv PP Vransko jezero)

Zbog svojih iznimnih prirodnih vrijednosti ima značajke zaštićenoga područja, i to na temelju više osnova. Park prirode osnovan je 1999. i zauzima prostor od oko 57 km². Uz cjelokupno jezero obuhvaća i njegove rubne dijelove, kao i dio Vranskoga polja. Dio zamočvarenog područja koji obuhvaća oko 8,8 km² na sjeverozapadnom dijelu Vranskoga jezera i dijela Vranskoga polja godine 1983. proglašeno je posebnim ornitološkim rezervatom Vransko jezero (slika 2.12.). Područje Jasena u Vranskom polju ima značajke Ekološke mreže RH. Ovo plitko jezero važan je močvarni lokalitet, tako da je Ramsarskom konvencijom početkom 2013. uvršteno na popis svjetski važnih močvara.

Slika 2.12.

Slika 2.12. Granice zaštićenih područja na širem području Vranskoga jezera - preuzeto (PP Vransko jezero, 2009 – prema DZZP, 2009)

Prema novijim hidrogeološkim ocjenama, sliv Vranskoga jezera ima oko 485 km² (HGI, 2012), a što s površinom jezera čini ukupnu površinu od oko 515 km² (slika 2.13.). Jezero se prihranjuje vodama više izvorišta u njegovu slivu, kao i površinskim vodama od kojih glavina dotječe kanalom Kotarka. Izgradnja ovoga kanala koji čini dio hidromelioracijskoga sustava započela je početkom 20. st. Prokopima tunela u odvodni su sustav Vranskoga polja sprovedene i površinske vode koje su nekad završavale u depresijama i ponirale u gornjim dijelovima sliva slivnoga područja Kličevica, Nadina i Polače (Hekman, 2006).

Slika 2.13.

Slika 2.13. Prikaz položaja Vranskoga jezera u Dalmaciji i njegova sliva (Rubinić i sur., 2010b)

Legenda:

- (1) hidrogeološka granica sliva,
- (2) regulacijski kanal,
- (3) stalni prirodni vodotok,
- (4) povremeni prirodni vodotok,
- (5) podzemna hidrogeološka veza,
- (6) izvor kaptiran za vodoopskrbu,
- (7) nekaptirani važniji izvor,
- (8) bočati izvor,
- (9) vrućica,
- (10) estavela,
- (11) ponor,
- (12) naselje

Hidromelioracijski zahvati na području Vranskoga jezera započeti su još u 18. stoljeću, kada je davne 1770. godine 800 m dugim prokopanim kanalom Prosika (slika 2.14.) jezero spojeno s morem. To je izvedeno radi smanjenja zamočvarenja Vranskoga blata/polja te kako bi se suzbilo tada proširenu malariju i osiguralo povećanje obradivih površina (Fortis, 1984; Mlinarić, 2009). Kanal je kasnije više

puta proširivan i produbljivan radi poboljšanja uvjeta odvodnje izgrađenoga hidromelioracijskog sustava. Najviša kota dna prokopa je na svega 0,44 m n. m. (Hrvatske vode, 2009). Zbog problema s određivanjem visinskih kota različitih poligonih vlakova na tom prostoru u visinskom sustavu „Trst“, moguće je odstupanje i desetak cm od te kote.

U takvim okolnostima jezero ima vrlo aktivnu vezu s morem koja se odvija na dvojak način. Neposredna je veza putem kanala Prosika kroz koji uglavnom istječe voda iz jezera (prosječno $1,15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Kada je tijekom dugotrajno sušnih razdoblja razina vode u jezeru niža od razine mora, događa se i da more neposredno utječe u Vransko jezero.

Slika 2.14.

Slika 2.14. Kanal Prosika – pogled s morske strane (izvor fotografije – arhiv PP Vransko jezero)

Jezero je posredno povezano s morem putem krškoga vodonosnika kod kojega se, kroz nekoliko grupa izvora, također odvija zaslanjenje jezerskog sustava. Zbog toga su značajne velike varijacije u sadržaju klorida, odnosno elektroprovodljivosti. Oscilacije se bilježe u sezonskim unutargodišnjim ciklusima, ali i unutar višegodišnjih razdoblja, ovisno o globalnim stanjima hidroloških prilika. Takve varijacije, odnosno povremeni iznimno visoki porasti saliniteta (Romić, 1995; Rubinić i sur., 2010b) i dugogodišnji izrazito naglašeni trendovi smanjenja dotoka i porasta razine mora, ugrožavaju jezerski sustav od pojave trajnijega zaslanjivanja koje bi mogle izazvati dalekosežne negativne promjene u ekološkom sustavu jezera te osiromašenje njegove bioraznolikosti. U pogledu povećanoga sadržaja klorida u jezerskoj vodi, posebno su

bile kritične tri godine: 1989., 2008. i 2012. Godine 1989. je na sjeverozapadnom dijelu jezera izmjerena maksimalna koncentracija klorida od 4765 mgL^{-1} (Romić, 1994), 2008. izmjereno je 6500 mg L^{-1} , a 2012. 8525 mgL^{-1} kada su navedene koncentracije zabilježene na kasnije uspostavljenoj postaji Prosika na jugoistočnom dijelu jezera koji intenzivnije zaslanjuje.

Ovo je iznimno vrijedan gospodarski prostor, jedna od najplodnijih površina središnje Dalmacije. Na Vranskom se polju, dolini koja se neposredno nastavlja na jezero, rasprostire oko 45 km^2 poljoprivrednog zemljišta, većim dijelom uređenoga. Upravo je osiguranje uvjeta za veći razvoj poljoprivrede i smanjenje obujma poplavljanja bio razlogom provođenja spomenutih hidromelioracijskih zahvata. Time su, kao i oduzimanjem dijela vodne bilance za potrebe navodnjavanja i vodoopskrbe, povećani rizici od zaslanjavanja jezerskoga sustava. Intenziviranje postojećih problema, kao i otvaranje dodatnih, posebno se očekuje u uvjetima mogućega nastavka negativnih hidroloških prilika te povećanja eksploatacije vode u slivu kao odgovoru društva na te promjene.

Uz postojeće korištenje voda za vodoopskrbu iz krških izvora koji prihranjuju vodotoke u slivu jezera na području Vranskoga polja te postojeće neprimjereno organizirano korištenje vode za navodnjavanje iz tih vodotoka i lokalnih izvora, očekuje se i veliki porast pritiska na korištenje voda za potrebe navodnjavanja. To je, naime, prostor koji s agronomskoga stanovišta predstavlja moguće najveće hidromelioracijsko područje u srednjoj Dalmaciji. Razvoj sustava za navodnjavanje planira se na $42,28 \text{ km}^2$, što za tipičan plodored daje ukupne godišnje potrebe od oko $14 * 10^6 \text{ m}^3$ vode, a za vrlo sušne godine $22 * 10^6 \text{ m}^3$ (IGH PC Zagreb, 2013). U takvim se okolnostima očekuje da bi svako daljnje pogoršanje klimatskih prilika

utjecalo na veće negativne promjene vodnoga režima jezera i njegova krškog vodonosnika, a time i na stabilnost jezerskoga sustava.

2.4. Geološka građa i hidrogeološke osobitosti sliva Vranskoga jezera

Prva detaljna istraživanja geološke građe i hidrogeoloških osobitosti širega područja Vranskoga jezera proveo je Franjo Fritz u okviru dviju hidrogeoloških studija (IGI, 1974, 1976) s rezultatima istraživanja koji su kasnije i publicirani (Fritz, 1978, 1984). Povećanjem saznanja o istraživanom prostoru Vranskog jezera, javile su se ideje o tome da je problem nemogućnosti korištenja jezerskih voda za navodnjavanje poljoprivrednih površina u Vranskom polju moguće riješiti pregrađivanjem jezera te podizanjem kote uspora i akumuliranjem voda u gornjem dijelu jezera (Elektroprojekt, 1983).

Tijekom ratnih zbivanja devedesetih godina prošloga stoljeća, na širem analiziranom području javio se problem nemogućnosti korištenja izvorišta regionalnoga vodoopskrbnog sustava za opskrbu većih priobalnih gradova i naselja vodom. Tada je obnovljena ideja o izgradnji pregrade na Vranskome jezeru, kako bi se akumulacijom osigurale vodne zalihe, osim za navodnjavanje, i za vodoopskrbu (Hrvatska vodoprivreda, 1994). Osim toga, za potrebe rješavanja akutnog problema vodoopskrbe analizirane su i mogućnosti zahvata voda na više drugih lokaliteta izvorišta i zahvata vode iz krškoga vodonosnika u slivu Vranskoga jezera.

Vodoistražni radovi započeli su sedamdesetih i osamdesetih godina prošloga stoljeća i bili su vezani uz izvorišta i moguće vodozahvate Begovača, Biba, Turanjsko jezero, Selakovo vrelo i Kutijin stan (IGI, 1976, 1994, 1995, 1997, 1999; Komunalac Biograd, 1985, 1993). Radovi su bili posebno intenzivni devedesetih godina, nakon

što je okupacijom onemogućeno korištenje najizdašnjega izvorišta Kakme, a što je za posljedicu imalo precrpljivanje i porast saliniteta u izvorištima Kutijin stan i Begovača (Kapelj J. i sur., 2003). Iako su se ta istraživanja uglavnom provodila bez uvažavanja međeutjecaja samoga Vranskog jezera i njegova krškoga vodonosnika, ona su osigurala dodatna saznanja o hidrogeologiji širega područja Vranskoga jezera i njegova utjecajnog prostora.

Najnovija hidrogeološka sagledavanja sliva Vranskoga jezera dao je Stroj (HGI, 2012). Prema njima se sliv Vranskoga jezera (slika 2.15.), uz neke manje značajne popravke, općenito podudara s ranije (Fritz, 1984) definiranim slivom te se proteže na srednjedalmatinskom prostoru - približno između Biograda, Zemunika, Škabrnje, Benkovca, Stankovaca i Pirovca. Što se tiče njihove hidrogeološke funkcije, dominantne su četiri grupe stijena. Vapnenci gornje krede ($K_2^{2,3}$, K_2^3) vrlo su propusne stijene unutar kojih je, kroz okršenu stijensku masu, razvijena podzemna hidrografska mreža. Kroz nju se prikupljaju i dreniraju podzemne vode k izvorima lociranim po rubu Vranskoga polja, kao i neposredno u samo jezero i more. Izmjene dolomita i vapnenaca donjega dijela gornje krede ($K_2^{2,3}$) su srednje vodopropusne stijene koje predstavljaju djelomični uspor kretanju podzemnih voda.

Slika 2.15.

Slika 2.15. Hidrogeološka karta sliva Vranskoga jezera (HGI, 2012) s označenim položajem triju dubokih bušotina (B-1, BK-1, BK-2) na kojima su provedena ispitivanja kakvoće voda po dubini (Kapelj S. i sur., 2008)

Veliki dio sliva čine vodonepropusne ili vrlo slabo vodopropusne fliške naslage ($E_{2,3}$) koje pružaju barijeru kretanju podzemnih voda. Hipsometrijski najniže područje sliva – Vransko polje, pa i sam prostor Vranskoga jezera pokrivaju kvartarni jezerski i proluvijalno-deluvijalni sedimenti koji su, zbog velikoga sadržaja glinovitih čestica, slabovodopropusni. Ti kvartarni sedimenti pokrivaju stijene krede i paleogena, male su debljine i nemaju veći utjecaj na regionalne tokove podzemnih voda.

No, spomenuti kvartarni sedimenti imaju važnu ulogu za ostvarivanje površinskih vodotoka. Naime, površinska hidrografska mreža razvijena je na područjima izgrađenima od naslaga eocenskoga fliša i kvartarnih taložina. Neki od vodotoka završavaju u ponorskim zonama kao što je, primjerice, ona nizvodno od Benkovca te se njihove vode javljaju na krškim izvorištima hidrološki povezanim s njima.

Niz antiklinala izgrađenih od propusnih karbonatnih stijena i s njima paralelne sinklinale s nepropusnim naslagama eocenskoga fliša u jezgri daju osnovni pečat hidrogeološkim odnosima u slivu Vranskoga jezera. Najznačajnija barijera iz eocenskoga fliša prostire se uzduž sjeveroistočnog ruba Vranskoga polja, uvjetujući i pojavu niza tamošnjih krških izvora. Barijera se nalazi na nekoliko desetaka metara iznad razine mora. Na tom prostoru istječu po izdašnosti najznačajniji stalni i povremeni izvori u Vranskom polju – izvor/bunar Tinj (minimalnoga kapaciteta $Q_{\min} = 10-15 \text{ ls}^{-1}$), Kakma (kaptiran za vodoopskrbu Biograda i Benkovca s $Q_{\min} = 180-200 \text{ ls}^{-1}$), Mali Stabanj ($Q_{\min} = 20 \text{ ls}^{-1}$, ali sa značajnim varijacijama u sadržaju klorida zbog kontakta sa zaslanjenim vodama u vodonosniku), povremni izvor Veliki Stabanj, izvor Biba (kaptiran s $Q_{\min} = 10-15 \text{ ls}^{-1}$), Begovača ($Q_{\min} = 5 \text{ ls}^{-1}$) te izvori Pećina i Škorobić koje karakteriziraju velike varijacije u protokama s minimalnim

izdašnostima od svega nekoliko ls^{-1} tijekom ljetnih sušnih razdoblja. Preljevne vode tih izvora prikuplja obodni - lateralni kanal, i uz ostale površinske vode koje se tu povremeno javljaju, neposredno odvodi u Vransko jezero.

Spomenuta barijera od eocenskoga fliša jugoistočno od izvora Škorobić ne seže dovoljno duboko, pa prestaje vršiti funkciju potpune barijere. Dio podzemnih voda drenira se neposredno u samome Vranskom jezeru, kao što je primjerice vrulja Živača locirana na njegovome sjeveroistočnom rubu. Tijekom sušnih razdoblja dio krških izvora presuši ili im se izdašnost znatno smanji, tako da u situacijama kada se njihove podzemne vode više ne prelijevaju preko spomenute podzemne barijere, preostaju njihova „izvorska oka“.

U središnjem i jugoistočnom dijelu Vranskoga polja nalazi se više izvora. Drenirajući prostor u području Biograda n/m i njegova krškoga zaleđa kroz temeljnu karbonatnu podlogu Vranskoga polja, neki izvori, udaljeni i do 8 km od mora, povremeno ipak imaju povećanu slanost. To su izvori Modro jezero, Ošac i Kotlić, smješteni u središnjem dijelu Vranskoga polja, južno od flišne barijere, ali u zoni gdje su kvartarne naslage pliće pa se uzdignuta vapnenačka podloga javlja u zoni cirkulacije površinskih voda. Ti izvori praktički djeluju kao jedna izvorišna zona, pri čemu se izvor Kotlić u sušnijim razdobljima ne prelijeva, već njegova razina odražava razinu podzemnih voda na širem prostoru Vranskoga polja. Za izvore Ošac i Modro jezero kao minimalne izdašnosti navedeni su vjerojatno precijenjeni podaci od čak 105 ls^{-1} (Hrvatska vodoprivreda, 1994). Sadržaj klorida na tim izvorima varira u rasponu od dvadesetak pa do preko 1500 mgL^{-1} .

Pojave istjecanja voda povišenoga stupnja saliniteta zapažene su i u južnim dijelovima Vranskoga polja, ali s manjim stupnjem zaslanjenja, i to kod izvora Vrbica i Jasen. No, na prostoru Vranskoga polja, južno od spomenute flišne barijere nalaze se

i izvorišta – novije izvedeni zahvati podzemnih voda: Turanjsko jezero ($Q_{\min} = 70 \text{ ls}^{-1}$) i Kutijin stan ($Q_{\min} = 36 \text{ ls}^{-1}$). Oni nikada nemaju povišenu koncentraciju klorida. Zaslanjuje i dio priobalnih izvora, smještenih uz rub Vranskoga jezera na dijelu uzduž vapnenačkoga grebena širine između 1 i 2,5 km koji jezero dijeli od mora. Pritom je najveća koncentracija tih izvora u južnom dijelu, gdje je i barijera najuža. Primjer toga je izvor Jugovir na kojem tijekom dugotrajnih sušnih razdoblja istječu vrlo zaslanjene vode. Takvo se istjecanje intenzivira u okolnostima povišenih razina mora koje su posljedica jačih pojava juga.

Prvi prikaz morfološke evolucije jezerskoga prostora povezan s globalnim promjenama razine Jadranskoga mora tijekom pleistocena i holocena koja uvjetuje i položaj erozijske baze površinskih i podzemnih voda te razine okršavanja, dao je Fritz (1984). Dok je razina mora bila niža od razine „ušća“ voda u Vranskoj depresiji, vode iz depresije drenirale su se kroz ponorske zone na rubu vapnenačkoga grebena oko Prosike, stvarajući i produbljavajući paleoreljef današnje depresije. Uzimajući u obzir morfološke značajke jezerskoga prostora, saznanja i pretpostavke o debljini kvartarnih sedimenata i dinamici njegova taloženja te saznanja o globalnim kolebanjima razine mora u prošlosti i vertikalnim pomacima - spuštanjima kopna, Fritz (1984) je utvrdio da je kopnena faza djelovanja depresije trajala do prije oko 9.000 godina. Tada je, prema Fritzu, razina mora bila oko 24 m ispod sadašnje razine. Ti se rezultati ne uklapaju u novije spoznaje Pirazzolija (2005) prema kojima se razina Jadranskoga mora ustalila tek prije oko 5.000 godina. Razina mora bila je tada na oko 40 m ispod sadašnje razine i zatim počinje usporavanje otjecanja i intenziviranje procesa taloženja u dnu depresije, gdje se postupno ostvaruje trajno jezero. Ti su se procesi pojačavali što se more više podizalo i što se razlika između razine vode u jezerskom prostoru i razine mora smanjivala.

Prema Fritzu (1984), za proces nastajanja i djelovanja Vranskoga jezera, kako u prošlosti tako i danas, značajna je uska fliška barijera koja se proteže od Biograda n/m do jezera i nastavlja se pružati ispod jezera uz jugozapadnu obalu. Ona tako sprečava otjecanje površinskih i podzemnih voda iz prostora depresije prema moru. Tek dalje prema jugoistoku, na mjestu gdje ova barijera prestaje, bilo je moguće podzemno otjecanje voda prema moru, odnosno postojali su svi uvjeti za ostvarivanje ponora u depresiji i otjecanje voda kroz vapnenački greben u more. Na tom se području i s jezerske i s morske strane nalazi niz vodnih pojava promjenjiva djelovanja, ovisno o sezonskoj razlici kolebanja razina vode u jezeru i razine mora. Iako je to rjeđa situacija, pojedinih godina, kada su razine vode u jezeru dugotrajnije niže od prosječnih razina mora, uspostavljaju se stalniji suprotni gradijenti otjecanja od uobičajenih, te morska voda podzemnim putem prodire k jezeru.

Najnovija istraživanja procesa sedimentacije na istraživanom prostoru (HGI, 2013; Ilijanić i sur., 2013) mijenjaju spomenute Fritzove pretpostavke. Prema rezultatima tih najnovijih sedimentoloških istraživanja koja su još uvijek u tijeku, dominantan utjecaj na pojavu Vranskoga jezera imalo je, uz promjene razine mora, nekadašnje Pirovačko jezero koje se rasprostiralo na području današnjega Pirovačkoga zaljeva. Naime, prema pronađenim ostacima slatkovodne faune ostrakoda u sedimentu Pirovačkoga zaljeva, može se zaključiti da je postojala i slatkovodna faza toga vrlo ograničenoga morskog zaljeva uvjetovanog orografijom okolnoga terena.

Na temelju provedenih datiranja sedimenata, koristeći tehniku akceleratorске masene spektrometrije (AMS) određivanja ^{14}C , obnovljena je povijest Vranskoga jezera. Krajem pleistocena i početkom holocena (11.000 g. prije n. e.), uz oko 55 m nižu razinu mora, na prostoru sadašnjega jezera vladali su sušni uvjeti s povremenim

pojavama bujičnih voda i povremenih bara s terigenim donosom sedimenta u taj prostor te istjecanjem voda kroz okršeni greben u tadašnje Pirovačko jezero. Daljnjim podizanjem razine mora na oko 25 m nižu razinu u odnosu na sadašnju (oko 9.000 g. prije n. e.) raste i razina mora u Pirovačkom jezeru što usporava/sprečava istjecanje vode iz Vranskog jezera u Pirovačko jezero. Također, počinje se formirati sadašnje Vransko jezero koje tako povezano s Pirovačkim jezerom djeluje do oko 7.500. prije n.e. Tada more počinje prodirati u Pirovačko jezero te postupno utjecati i na Vransko jezero. Prije oko 4.000 godina prije n. e. uspostavljen je sadašnji režim Vranskoga jezera s učestalim sezonskim izmjenama blago brakičnih i slatkovodnih uvjeta, uz podizanje globalne razine mora i jezera do sadašnjih prilika.

Procesi okršavanja koji su se odvijali tijekom razvoja reljefa, razvijajući pritom podzemne krške forme i prostore na znatno većim dubinama od postojećih aktivnih hidroloških veza između jezera i mora (Ford i Williams, 2007) uvjetovali su otvorenost vodonosnika i prisutnost dubokih okršanih prostora u zaleđu koji su ispunjeni zaslanjenom morskom vodom (Kapelj S. i sur. 2003, 2008). To je utvrđeno praćenjima elektroprovodljivosti po dubini u trima bušotinama u Vranskom polju dubokim oko 100 m (slike 2.15. i 2.16.), a koje sežu i duboko ispod razine mora.

Rezultati spomenutih motrenja ukazali su na to da se duboko ispod razine terena Vranskoga polja proteže sloj zaslanjene vode. Intenzitet veza tog sloja sa svježim podzemnim vodama ovisan je o položajima vodonepropusnih slojeva. To je moguće zato što je proces okršavanja, zbog niže drenažne razine Jadranskoga mora tijekom posljednje oledbe, sezao daleko dublje (slika 2.17.).

Dinamika unosa i sezonske promjene sadržaja klorida u vodama izvora i vodonosniku na Vranskome polju ukazuje na to da se one ne mogu jednostavno pripisati djelovanju fosilne morske vode u dubljim dijelovima vodonosnika, nego da

su prije svega ovisne o dinamici stanja hidroloških prilika, pa i o hidrološkim prilikama na Vranskome jezeru. Na obodu Vranskoga jezera, duž njegova hrpta koji ga dijeli od Jadranskog mora, zbivaju se, pak, učestala unutar-dnevna i različito usmjerena kretanja slatkih podzemnih voda i morske vode. Nadpritisak slatkih voda je tu uglavnom relativno slab zbog nepostojanja dovoljno stabilne slatkovodne leće, a dnevne oscilacije plime i oseke izazivaju stalne promjene gradijenta istjecanja podzemnih voda, pa i utjecanja mora u samo jezero. Na slici 2.18. fotografije su dvaju zona najintenzivnije podzemne povezanosti Vranskoga jezera i mora – izvora Jugovir smještenoga na krajnjem jugoistočnom dijelu jezera, kao i izvorišne zone smještene na sjevernome rubu morskoga zaljeva kod Prosike.

Slika 2.16.

Slika 2.16. Raspodjela el. vodljivosti u bušotinama B-1, BK-1 i BK-2 u Vranskom polju

(Kapelj S. i sur., 2008)

Slika 2.17.

Slika 2.17. Shematizirani hidrogeološki presjek: a) recentno razdoblje, b) tijekom holocena

(Kapelj S. i sur., 2008)

Slika 2.18.

Slika 2.18. Izvorišne zone najintenzivnije povezanosti jezera i mora: a) Izvor Jugovir - mjesto vrlo

izraženog utoka zaslanjenih voda u jezero, b) bočati izvori u zaljevu kod Prosike

2.5. Jezerski prostor, hidrotehnički zahvati i korištenje voda u slivu

Unatoč tome što se Vransko jezero smatra po površini najvećim jezerom na području Hrvatske, reljef njegovoga dna dugo je vremena bio slabo poznat. Jedini poznati podaci sastojali su se od sedam poprečnih presjeka snimljenih još prije šezdesetak godina (Hidroprojekt, 1948). Tek je tijekom svibnja i lipnja 2011. napravljen detaljni batimetrijski snimak Vranskoga jezera na temelju profila u razmacima od 200 m, sa snimljenim točkama dubina po profilima na udaljenosti od po 10 m (Teodolit, 2012). Na temelju toga napravljen je digitalni model reljefa dna jezera (slika 2.19.). Za napomenuti je da je spomenuti digitalni model napravljen u starome HVRS 1875 visinskom sustavu koji je poznat i kao stari sustav Austro-Ugarske monarhije vezan uz mareografsku kotu u Trstu. S obzirom na to da novi Hrvatski visinski referalni sustav (HVRS71) još nije zaživio na analiziranom prostoru, odnosno da su sve raspoložive informacije o visinskim međuodnosima terena, vodnih pojava i karakterističnih mjernih točaka gotovo isključivo vezane za spomenuti stari HVRS 1875 sustav, on je korišten i u svim elementima ovoga doktorskog rada.

Na temelju provedenih snimanja Teodolita (2012) napravljen je i prikaz reljefa dna kod srednje razine vode u jezeru od 0,82 m n. m., praktički istoj srednjoj višegodišnjoj razini vode u jezeru (tablica 5.4.). Na osnovi toga dani su i karakteristični presjeci (slika 2.19.) iz kojih je vidljivo da je jezero vrlo plitko i da dno ima smjer pružanja od Vranskog polja na sjeverozapadnom dijelu k Prosiki na jugoistočnom dijelu jezera. Pritom se najveće dubine nalaze uz vapnenački greben jezera koji ga dijeli od mora. To je, uz morfologiju jezerskoga prostora, najviše posljedica protjecanja podzemnih voda i mora kroz taj greben, a što je utjecalo na sedimentacijske procese. Najniža snimljena kota dna u jezeru je 3,57 m n. m. i nalazi se uz rub jugoistočnog dijela jezera, 1,6 km sjeverozapadno od početka kanala

Prosika. Kako je vidljivo iz karakterističnog poprečnog presjeka B-B, postoji izrazita asimetrija u pružanju pokosa dna jezera na njegovoj sjevernoj i južnoj strani. To je tako zbog stalno prisutne komunikacije vode u jezeru i u podzemnom krškom vodonosniku vapnenačkoga grebena koji dijeli jezero od mora. Ovisno o hidrološkim prilikama u podzemlju, u situacijama viših razina vode u jezeru dominantno je usmjereno strujanje podzemnih voda k jezeru, a kad se dotoci smanje, u smjeru gubitaka vode iz jezera. U situacijama niskih razina vode u jezeru, ono je pod utjecajem promjenjivog režima tečenja podzemnih voda na koji bitno utječu kolebanja razine mora.

Prema prikazanim krivuljama (slika 2.20.), površina Vranskoga jezera pri srednjem vodostaju (0,81 m n. m. prema podacima s hidrološke postaje Prosika za razdoblje 1948.-2012.) iznosi 31,12 km². Pri dosad minimalno zabilježenom vodostaju (-0,16 m n. m.) iznosila je 29,34 km², a pri maksimalnom vodostaju (2,24 m n. m.) iznosila je 37,24 km². Odgovarajući volumeni iznose 74,53 * 10⁶ m³ za srednji vodostaj, 44,90 * 10⁶ m³ za minimalni te 119,95 * 10⁶ m³ za maksimalni. Prema tome, aktivni volumen jezera, unutar maksimalnoga raspona zabilježenih oscilacija razina vode u jezeru, iznosi čak 71,42 * 10⁶ m³.

Slika 2.19.

Slika 2.19. Batimetrijski snimak dna Vranskoga jezera: a) situacijski snimak, b) presjek A-A,
c) presjek B-B - pripremljeno prema premjeru Teodolita (2012)

Vezano uz kolebanja razine vode u jezeru, za spomenuti je i povijesne hidrotehničke radove koji su bitno uvjetovali promjenu rubnih uvjeta djelovanja

jezerskoga sustava. Još oko 1770. jezero je neposredno spojeno s morem putem oko 800 m dugog kanala Prosika. Nije poznato za koliko je tadašnjim prokopom kanala razina vode u jezeru snižena, no informacija koja se zadržala u pučkom kazivanju da se radilo o sniženju od oko 3 m vjerojatno je znatno preuveličana. Naime, u tom slučaju jezero bi površinom bilo daleko rasprostranjenije u odnosu na postojeću pri srednjoj razini, ali i u odnosu na njegove konture narisane na ranijim kartografskim prikazima. Obrađivaču su po toj osnovi bile dostupne tri povijesne karte.

Slika 2.20.

Slika 2.20. Prikaz odnosa površina (F) i volumena (V) Vranskoga jezera

Dvije od tih karata prikazane su u knjizi Povijesna kartografija (Slukan Altić, 2003). Prva je ona nizozemskoga kartografa Jana Janssoniusa iz 1646. koja prikazuje dosege osmanlijskih osvajanja u Dalmaciji (slika 2.21.). Druga je Corronelijeva karta zadarskoga okružja iz 1688. (slika 2.22.). Na njoj su konture Vranskoga jezera prikazane tako da se vidi da se jezero nije protezalo na značajno većem dijelu Vranskoga blata u odnosu na stanje nakon prokopa Prosike.

Slika 2.21.

Slika 2.21. Prikaz Vranskoga jezera na karti osmanlijskih osvajanja u Dalmaciji Jana Janssoniusa

(Slukan Altić, 2003)

Slika 2.22.

Slika 2.22. Corronelli-jev prikaz Vranskoga jezera na karti zadarskoga okružja iz 1688.g.

(Slukan Altić, 2003)

Vrlo detaljan kartografski prikaz Vranskoga jezera i Vranskoga blata napravio je vojni inženjer Lodoli 1746. (slika 2.23.). To je posljednja raspoloživa karta analiziranoga područja prije izgradnje prokopa Prosike. Izgradnju je inicirao Francesco Borelli koji je u posjed Vranskoga feuda došao 1752. Spomenute godine on daje prijedlog za isušivanje Vranskoga blata (sada Vranskoga polja) pomoću dva kanala – jednog na mjestu kasnije Prosike i drugog kod Pakošтана. Prvi projekt prokopa kanala Tatinje (kako je bio prvobitni naziv za kanal Prosiku), na kojem su bili ucrtani već izvršeni radovi na prokopu kao i planirano stanje, datira iz 1762., a 1763. već je bilo prokopano oko 1/3 dužine kanala s morske strane. Naknadne korekcije projekta proveo je 1766. inženjer Marković. Prokop kanala dovršen je 1770. No, već 1886. razmišlja se o izgradnji i drugoga kanala kod Pakošтана (Peričić, 1971; Mlinarić, 2009).

Slika 2.23.

Slika 2.23. Situacija Vranskoga jezera i močvarnoga područja sadašnjega Vranskog polja prije prokopa kanala Prosika – plan vojnoga inženjera Lodolija iz 1746. (izvor: fotografija plana iz arhiva obitelji Borelli)

Karakteristični poprečni presjek kanala prokopanoga krajem 18. stoljeća nalazi se na slici 2.24.a. Poznato je da je dno kanala bilo široko oko 4 m, ali, nažalost, nije bila poznata kota dna kanala. No, može se pretpostaviti da je bila povišena u odnosu

na postojeće stanje. Stoga je, umjesto spomenutog snižavanja razine Vranskoga jezera od 3 m, vjerojatnije da su se prokopom kanala Prosike snizile ponajviše samo visoke razine voda u jezeru koje su uzrokovale stalno zamočvarenje prostora sadašnjega Vranskoga polja. Toj tvrdnji idu u prilog i zapisi prethodno spomenutog Alberta Fortisa. On je svoja zapažanja s nekoliko putovanja između 1771. i 1773. zapisao u svojoj knjizi „Put po Dalmaciji” (Fortis, 1984). Trinaesto poglavlje prvoga sveska nosi naslov “O Vranskome jezeru, o njegovom odvodnom kanalu te o ribarenju”.

Ovi su zapisi nastali upravo u vrijeme kada je prokopan kanal Prosika. O planiranom učinku na povećanje obradivih površina, zbog stanja koga je zatekao, Fortis se odnosi sa skepsom. Njegove zabilješke korisne su i za datiranje prokopa kanala. Naime, prema saznanjima s kojima raspolaže PP Vransko jezero, kanal je nakon 18 godina pripreme i rada početno prokopan 1770. No, Fortis je posjetio područje Vranskoga jezera vjerojatno 1772. ili 1773., dakle, dvije godine nakon što je kanal trebao biti dovršen u tada planiranoj geometriji. Njegove bilješke govore u prilog tome da kanal tada ipak još nije bio dovršen.

....“*Vransko jezero u Dalmaciji slavno je i poznato i u Mlecima, više nego druga u tim krajevima, koliko po svojoj znatnoj duljini od dvanaest milja, toliko po planu što ga je zamislila, a dijelom i ostvarila, jedna privatna osoba da prokopa odvodni kanal kojim bi se vode iz njega prelile u more. Od pokojnog Zendrinija zatražen je savjet o mogućnostima takvog otjecanja, ali ga nisu zvali na lice mjesta. On se oslonio na mjerenje razina što ga je ugrubo obavio ne znam koji inženjer; i nije vidio drugih teškoća osim troškova, jer je posrijedi bilo to da se prokopa do znatne dubine prevlaka od živa kamena u dužini od pola milje. Troškovi nisu zaplašili projektanta koji, obdaren blagošću Preuzvišenog Senata, poduzme i tako reći skicira svoj posao, iskopavši pomoću topovskog praha kanal koji već mnogo godina leži*

napušten i nedovršen, pa ostane li tako, za kratko će se vrijeme zatrpati zbog urušavanja strana. Kanal je imao svrhu isušiti i osposobiti za obradu 14.000 jutara zemlje pokrivena vodom za koju se predpostavljalo da je stajaća i da može oteći...“

Nadalje, Fortis tadašnju ulogu prokopanoga kanala ocjenjuje kao da „...*bi sada najviše mogao poslužiti da daje malo brži ispust prekomjernoj kišnici“*.

Fortis bilježi i da *“jezerske vode, probijajući se podzemnim putem kroz razmeđe kamenih slojeva, dolaze same od sebe u more za oseke; to im je putovanje zapriječeno kada voda poraste ili je na srednjoj razini”* (misli se na razinu mora). Znači, razina vode u jezeru se i tijekom toga povijesnog razdoblja, prije konačnoga dovršetka izgradnje odvodnog kanala, znala spuštati toliko nisko da za plime nije bilo dovoljno izraženoga hidrauličkog gradijenta da bi jezerske vode podzemnim okršenim putovima u većoj mjeri otjecale u more. Fortis, nadalje, učinak odvodnoga kanala promatra i u duljem vremenskom razdoblju te predviđa postupno smanjivanje količina voda koje otječu iz jezera zbog već i tada zapaženoga učinka podizanja razine mora i spuštanja terena. Fortis se u svome djelu poziva na ranije Ljubavčeve zapise prema kojima je jezero do 1630. bilo veoma slatko, nakon čega se njegova veća bočatost pripisuje djelovanju potresa na otvaranju većega broja krških kanala na putu podzemnoga povezivanja jezera s morem. Fortis negira spomenuto tumačenje. Današnje spoznaje govore da bi se takvo hidrološki dugotrajno povoljno slatkovodno razdoblje o kojemu govori Ljubavčev ponajviše moglo pripisati učincima naglašene faze tzv. maloga ledenog doba, koje je upravo do tada imalo jedan od svojih maksimuma (Esper i sur, 2002).

Zanimljivo je da se dvojbe o slanosti Vranskoga jezera protežu i tijekom znatno kasnijih vremena. Tako Klaić (1878) navodi da je od jezera u Hrvatskoj slano jedino Vransko jezero, pri čemu i on spominje da prema starijim zapisima voda jezera

do 1630. nije bila slana. Nasuprot tome Gavazzi (1889) provodi ispitivanja gustoće jezerske vode 12.9.1888. pri vodostaju u jezeru od oko 2 m n. m. i navodi da je ona potpuno slatka. U svome radu sumnja u ranije navode Pettera (1856.–1857.) i Carrare (1846.) da je voda u jezeru slana. Očito je da su veće varijacije u značajkama slanosti vode u jezeru već odavno prisutne. Gavazzi u istom radu navodi i da među mještanima nema spoznaja o utemeljenosti Carrarinih navoda o trideset i tri kanala po kojima je jezero u vezi s morem. On smatra da je povezanost mogla biti moguća jedino putem kanala Prosike, pa je očito da se tu radi o podzemnim okršenim kanalima, odnosno mjestima izviranja i uviranja voda iz jezera za koje se pretpostavlja da su povezana s morem.

Obnova odvodnoga kanala Prosika, najprije čišćenje zbog zatrpanosti, a kasnije zbog proširenja i produbljenja, provođena je u još nekoliko navrata. Najprije je, krajem 19. stoljeća za vrijeme austrijske uprave, kanal produbljivan samo u manjem obujmu. Početkom 20. stoljeća kanal je ponovno obnovljen u duljini od 840 m sa širinom dna od 4 m. Proširenje na konačnih 8 m provodilo se od 1948. do 1953. (Hekman, 1971, 2006). Dužina tako prokopanoga kanala iznosi oko 890 m. Poprečni presjek je trapezne forme sa stranama blago nagnutim prema vertikali i širinom dna na čitavoj dužini od 8 m. Dno kanala gotovo je horizontalno. Obalu i dno prokopa kanala čine okršene vapnenačke stijene, dijelom obzidane kamenom u betonu, s dubinom u odnosu na dno između 2 i 7 metara.

Tijekom 2009. došlo je do manje promjene presjeka kanala Prosike. Najprije je tijekom lipnja PP Vransko jezero izveden privremeni zagat s vrećama pijeska kako bi se usporilo istjecanja voda iz Vranskoga jezera i smanjilo daljnje zasljanjivanje jezerskoga sustava. To je bilo samo privremeno rješenje do izvedbe fiksnoga praga i riblje staze na nizvodnijem dijelu kanala (slika 2.24.b.) tijekom kolovoza 2009. prema

projektu „Preljevni prag s ribljom stazom u kanalu Prosika – idejno rješenje” (Hrvatske vode VGO Split, 2009). Najniža kota praga preljeva toga kanala je prema spomenutom projektu trebala je biti 0,80 m n. m., ali je geodetskom provjerom u srpnju 2014. (Geodata, 2014) utvrđena kota od 0,88 m n. m. (slika 2.24b.).

Slika 2.24.

Slika 2.24. Kanal Prosika: a) Poprečni profili kanala Prosika iz 18.stoljeća (fotografija iz arhiva obitelji Borelli); b) Nizvodni dio kanala Prosika s izvedenim fiksnim pragom (fotografija iz arhiva PP Vransko jezero)

Usporedno s tehničkim zahvatima na prokopu kanala Prosike, još je tijekom druge polovine 18. stoljeća započeta i izgradnja hidromelioracijskoga sustava na prostoru Vranskoga polja, odnosno Vranskoga blata. Tako se već 1773., dakle tri godine od dovršetka prokopa Prosike, spominju i dva nova prokopana kanala u Vranskome polju – Borela i Koferčica. Kasnije je hidromelioracijski sustav postupno nadograđivan, o čemu svjedoči i rast prinosa uslijed sve manje površina s neriješenom odvodnjom. Posebno se to odnosi na razdoblje s početka 20. stoljeća kada je obnovljena i produbljena Prosika s kotom dna kanala od 0,32 m n. m., ali s prvotnom širinom od 4 m. Tada je izvršeno melioriranje 1.200 ha Vranskoga polja (od kote 3-16 m n. m.) pri čemu je izgrađeno oko 29 km glavnih i 42 km sekundarnih kanala. Dio kanala dužine 12,35 km služio je i za sakupljanje vode za navodnjavanje, pretežno s izvora Kakme. U razdoblju od 1945. do 1953. kanal Prosika proširen je na postojeću širinu od 8 m, a u Vransko jezero su izgradnjom tunela prevedene i vode Nadinskoga blata i Polačkoga polja. Izveden je i Lateralni kanal koji prikuplja vode niza izvora

smještenih na sjevernom rubu Vranskoga polja. Nakon toga su hidromelioracijski radovi na Vranskome polju nastavljeni te završeni do 1970. Obnovljen je kanal i nasip Kotarke, više zaštitnih nasipa uz polje te se izgradio sustav unutarnje odvodnje s odvodnom mrežom, kao i crpna postaja Jasen kapaciteta $2 \times 1,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Hekman, 1971).

Sredinom sedamdesetih i početkom osamdesetih godina prošloga stoljeća počinje se razvijati i zamisao izgradnje brane i akumulacije u dijelu Vranskoga polja (IGI, 1974). Time bi se od gornjega dijela jezera srednje površine od oko 20 km^2 odijelila jugoistočna zona jače izraženih dodira jezera s morem te ostvarila zaliha slatke vode namijenjena navodnjavanju, pa i vodoopskrbi. Studijom Elektroprojekta (1983) predviđala se izgradnja 1.522 m dugačke brane, kote normalnoga uspora 2,02 m n. m., a maksimalnoga 3,27 m. n. m. Kota krune brane bila je predviđena na 4,5 m n. m. s 6 m širine, s temeljima na slojevima gline teško gnječivoga do polučvrstoga stanja koji se nalaze ispod gornjih slojeva žitkoga stanja. Predviđeno je da bi se takva brana ostvarila u dvije etape, u prvoj do kote 1,5 m n. m. Planirano je da akumulacija u konačnoj fazi sadrži oko $39,6 * 10^6 \text{ m}^3$ vode, pri čemu je oko $15 * 10^6 \text{ m}^3$ namijenjeno za navodnjavanje i osiguranje gubitaka vode na isparavanje, a oko $9 * 10^6 \text{ m}^3$ za vodoopskrbu. Radi osiguranja dodatnih terenskih podataka o značajkama pregradnoga mjesta, čak je izvedeno i probno polje – početak pregrade u duljini od oko 60-tak m, s južne obale jezera, oko 2 km zapadno od Draga. No, s obzirom na dobivene rezultate na spomenutom probnom polju (Geoexpert, 1988), koji su ukazali da su početne pretpostavke o mogućnosti temeljenja bile preoptimistične, te da će se temeljenje morati ostvariti do puno većih dubina od predviđenih, čak do kota 10–12 m ispod razine mora, te iznimno skupih radova vezanih uz potrebu izvedbe promjena

hidromelioracijskoga sustava Vranskoga polja i njegovih glavnih kanala i nasipa, od ostvarivanja spomenutoga projekta se odustalo.

Sama ideja akumulacije ipak je obnovljena tijekom okupacije niza izvorišta vode za priobalne gradove i naselja na početku devedesetih godina, te je izrađena „Prethodna studija utjecaja na okoliš akumuliranja vode Vranskoga jezera“ (Rožić, 1994; Hrvatska vodoprivreda, 1994). U tim je dokumentima, uz obnavljanje ideje akumulacije u ranije predviđenim dimenzijama, izneseno i mišljenje o mogućim drugačijim rješenjima s manje zahtjevnim uvjetima temeljenja. Tako je nizvodnije planirana pregrada Babin Škoj (duljine 400 m) s djelomičnim otješnjenjem desnoga boka akumulacije i potrebnom kotom normalnoga uspora od 1,60 m n. m. Tako bi se zona navećih prodora mora oko izvora Jugovir i Prosike izolirala od glavnine jezera. Kao drugo rješenje ističe se i moguća izgradnja ustave na početku kanala Prosika, prvotno planirane dvadesetak godina ranije (Hidroprojekt, 1973). Time se ne bi mogla ostvariti slatkovodna akumulacija, ali bi se moglo usporiti površinsko otjecanje voda kanalom Prosika. Zamisao o regulacijskoj ustavi na Prosiki ponovno je obnovljena na skupu „Hidrološka stabilizacija i očuvanje biološke raznolikosti slivnoga područja Parka prirode Vransko jezero” koji je organizirao PP Vransko jezero 2003. U radu Pintura (2003) navodi se potreba izvedbe regulacijske zapornice za koju je izrađeno idejno rješenje izvedbe mehaničke zapornice (Đuro Đaković inženjering, 2008), ali bez ulaženja u vodnogospodarska gledišta toga rješenja. U radu Švonje (2003) potvrđuje se mogućnost predložena u dokumentu Hrvatske vodoprivreda (1994): podizanje prve faze praga na Prosiki, odnosno nadvišenje dna kanala do kote 0,50 m n. m. izvedbom fiksnoga praga. To je tijekom 2009. i izvedeno, ali za 30-ak cm povišenom kotom dna u odnosu na prvotno planirano (slika 2.24.).

Inače, korištenje voda u slivu Vranskoga jezera i planiranje i izgradnja uz to vezanih infrastrukturnih sustava ima iznimno dugu tradiciju. Tako su poznati arheološki nalazi rimskoga akvedukta Vrana – Jadera (Ilakovac, 1971, 1982) koji je sakupljao vodu izvora Bibe, Subibe i Pećina te je dovodio čak do Zadra. Zanimljivo je zapažanje, doneseno prema položaju nasipa tzv. Gaza čijom su se jednom dionicom vode spomenitih izvora prevodile s druge strane Vranskog blata, da srednja razina Vranskog jezera u rimsko doba nije bila značajnije različita od postojeće. No, u to je doba srednja razina mora bila značajno niža nego li danas. Ilakovac (1971) navodi pretpostavku da se radi o razini nižoj za oko 2 m. Prevođenje voda na drugu stranu doline sa sniženjem nivelete od čak oko 35 m na duljini od oko 5,5 km bio je za ono vrijeme iznimno zahtjevan tehnički problem. Riješeno je sa sifonskom dionicom s isprva kamenim cijevnim elementima koji su zbog velikog tlaka i loše mogućnosti brtvljenja kasnije zamijenjeni olovnim cijevima. Izgradnja akvedukta datira iz I. stoljeća, a pretpostavlja se da su napušteni dijelovi njegove kamene sifonske dionice iskorišteni za osiguranje vode za navodnjavanje posjeda rimskih vila smještenih na tom području.

Navodnjavanje na području Vranskoga polja ima iznimno dugu povijest koja seže još u Rimsko doba i doba Mletačke uprave, odnosno u vrijeme kada su Borellijevi preuzeli brigu oko Vranskoga posjeda. No, prostor Vranskoga polja jedan je od prvih u priobalnome dijelu Hrvatske na kojem je tijekom druge polovice 20. stoljeća razvijen organizirani sustav navodnjavanja poljoprivrednih površina. Ti su sustavi i sada u funkciji u okviru sustava Jankolovica (403 ha), Sokoluša (80 ha), Tinj (50 ha) i Nova zora (176 ha). U sustavu državne agencije Arkod zabilježen je i 41 ha navodnjavanih površina osobnih korisnika, no procijenjuje se da i značajan dio nezabilježenih osobnih korisnika također navodnjava dio svojih poljoprivrednih

površina (IGH PC Zagreb, 2013). Zahvati vode su iz glavnoga kanala Kotarke, Lateralnoga kanala, mini akumulacije Vrbica i iz dvije lagune uz korito Kotarke, izvora Mali i Veliki Stabanj, bunara Kutijin stan, Vučipolje i bunara kod izvora Vrulje kod Tinja, s oko 400 ls^{-1} instaliranoga ukupnog kapaciteta (IGH PC Zagreb, 2013). Spomenuta je studija dala okvirna fazna rješenja za navodnjavanje sveukupnih mogućih površina u slivu s ukupno 4.228 ha te potrebnim količinama voda u prosječnoj godini od $13,6 * 10^6 \text{ m}^3$. U vrlo sušnoj godini to je oko $17 * 10^6 \text{ m}^3$, odnosno čak 84 % od ukupno procijenjenoga dotoka vodnih resursa Vranskoga polja (vodotoka i postojećih izvorišta) u Vransko jezero. Zbog toga je predviđeno da bi se značajne količine voda (oko $8,2 * 10^6 \text{ m}^3$) preuzele kao viškovi iz vodoopskrbnog sustava vodovoda Biograd – Zadar, kao i interventnog vodovoda sa zahvatom iz rijeke Krke. S obzirom na stanje vodnoga sustava Vranskoga jezera, u kojem se problemi zaslanjivanja javljaju već i pri postojećoj razini korištenja voda za vodoopskrbu i navodnjavanje, očito je da se radi o precijenjenim planovima koji će pri ostvarivanju više pozornosti morati posvetiti definiranju i osiguravanju ekološko - prihvatljivih protoka (Građevinski fakultet Rijeka, 2011).

Što se pak tiče javne vodoopskrbe, s izvora na području sliva Vranskoga jezera godišnje se prosječno koristi oko $3,4 * 10^6 \text{ m}^3$, odnosno prosječno oko 110 ls^{-1} . Maksimalne srednje mjesečne zahvaćene količine s pojedinih izvora su slijedeće: Turanjsko jezero (58 ls^{-1}), Kakma (174 ls^{-1}), Begovača i Biba (19 ls^{-1}) (Građevinski fakultet Rijeka, 2008). Najznačajniji izvor kojega koriste vodovodi Biograd i Benkovac je Kakma s minimalnim kapacitetom od 116 ls^{-1} (Švel, 1994).

2.6. Hidrološki model djelovanja Vranskog jezera, njegova krškog vodonosnika i mora

Vransko jezero se dinamički uravnotežuje s morem. Na temelju hidrogeoloških sagledavanja provedenih u poglavlju 2.4., shematiziranoga hidrogeološkog situacijskog prikaza (slika 2.25.), karakterističnoga uzdužnog presjeka kroz jezero i njegov vodonosnik (slika 2.26.) te rezultata praćenja sadržaja klorida i elektroprovodljivosti (poglavlje 5.4.) može se zaključiti da se najintenzivnije međudjelovanje jezera i mora odvija kroz južni dio uskoga okršenog hrpta koji jezero dijeli od mora. Tamo se putem kanala Prosika i nalazi otvorena veza s morem. Sam hidrološki koncept djelovanja jezerskoga sustava, njegova krškoga vodonosnika i mora na južnom dijelu jezerskoga sustava prikazan je na slici 2.27.

Vapnenački hrbat koji dijeli jezero od mora širine je do jedan kilometar. Stoga je vrlo nepogodan da bi se u njemu na dulje vrijeme ostvarila stabilna vodna leća koja je u stanju svojim hidrostatskim djelovanjem potisnuti zaslanjenu morsku vodu iz zone međudjelovanja podzemnih voda s jezerom. Razlozi za to su višestruki. Prije svega to je vrlo izražena okršenost s vrlo velikom zastupljenošću podzemnih kanala koji predstavljaju privilegirane smjerove protjecanja vode na relaciji jezero - more. Kroz vapnenački hrbat relativno brzo protječu, ne samo podzemne, nego i preljevne vode iz jezera te slanija morska voda pomiješana s jezerskom. Isto tako, dodatni su razlog i vrlo izražene dnevne oscilacije razine mora pod utjecajem plime i oseke, kao i periodične i sezonske oscilacije mora prouzročene promjenama atmosferskoga tlaka i smjera vjetrova. Na dvosmjernu cirkulaciju vode kroz vapnenački hrbat takođe utječe i oscilacija razine samoga jezera.

Slika 2.25.

Slika 2.25. Shematizirana hidrogeološka karta - prema Fritzu (1984)

Legenda: 1. Kvartar, 2. Vapnenci, 3. Dolomiti, 4. Fliš, 5. Krški izvori slatke vode (povremen i stalan),
6. Bočati izvori (povremen i stalan), 7. Vrulja, 8. Estavela, 9. Krška jama s vodom, 10.
Glavni rasjedi, 11. Os antiklinale, 12. Os sinklinale, 13. Uzdužni presjek

Slika 2.26.

Slika 2.26. Shematizirani presjek kroz Vransko jezero i okolni vodonosnik - prema Fritzu (1984)

Legenda: 1. Prašinate gline, 2. Laponi, 3. Vapnenci, 4. Dolomiti, 5. Rasjed, 6. Jezero,
7. More

Slika 2.27.

Slika 2.27. Detalji poprečnog presjeka kroz karbonatni hrbat koji dijeli Vransko jezero od mora s karakterističnim hidrološkim međuodnosima slane i slatke vode: a) stanje visokih razina vode u jezeru tijekom vodnoga hidrološkog razdoblja, b) stanje visokih razina tijekom sušnoga hidrološkog razdoblja, c) stanje niskih razina vode u jezeru tijekom sušnoga hidrološkog razdoblja

U vodnim hidrološkim prilikama, kada su razine vode u jezeru veće nego li u moru, unutar dijela krškoga vodonosnika ostvarenog u samome hrptu koji dijeli jezero od mora, ostvaruje se vodna leća koja s jedne strane prihranjuje jezero, a s druge strane drenira podzemne vode koje otječu prema moru (slika 2.27.a). No, kada se u takvim hidrološkim prilikama smanje dotoci iz podzemlja, voda iz jezera otječe prema

moru kroz okršene podzemne puteve (slika 2.27.b). U sušnim hidrološkim prilikama, pri niskim razinama vode u jezeru, odvijaju se i prodori zaslanjene morske vode u jezero kroz krško podzemlje (slika 2.27.c). Kada su razine mora više od dna kanala prokopa Prosika kao i više od razine vode u jezeru, prodori se odvijaju čak i kroz kanal Prosika. Zbog vjerojatnoga pružanja okršenih kanala i na većim dubinama, moguće su i složenije kombinacije gibanja voda u jezerski sustav i njezina istjecanja. Izvedba i kasnija obnova prokopa kanala Prosika koja je provedena vrlo opsežnim miniranjima, imale su za posljedicu povećanje deformacija u stijenskoj masi bokova i dna kanala, u otvaranju i povezivanju novih pukotinskih sustava. Posljedice toga su naglašena otvorenost prostora i izvan samoga presjeka kanala, povećanja intenziteta strujanja voda te gubitak vode iz jezera na tom prostoru.

Veća visinska razlika razine vode u jezeru u odnosu na razinu mora osigurava i veću zaštitu jezera od zaslanjivanja u smislu prisustva većih gradijenata tečenja podzemnih voda koje potiskuju zaslanjene morske vode iz samoga krškog vodonosnika. To općenito pravilo vrijedi ne samo za hidrološke međuodnose koji vladaju u vapnenačkom hrptu, nego i za zaštitu izvora u Vranskom polju od zaslanjenja do kojega dolazi uslijed prodora mora u dubokoj okršenoj podini ispod samoga polja. Nastupom očekivanih klimatskih promjena/ varijacija, došlo bi do podizanja razine mora te bi se ravnotežno stanje između jezera i mora uspostavljalo pri nešto višim razinama vode u jezeru. No, takav visinski pomak cijeloga jezersko-morskoga sustava sam po sebi ne bi bio problematičan da procijenjene klimatske promjene ne rezultiraju i povećanjem temperature zraka (a time i povećanom evapotranspiracijom u slivu i evaporacijom s površine jezera) te smanjenjem količina palih oborina. To sve imalo bi pak za posljedicu i bitno smanjivanje dotoka u jezerski sustav. Tako se općenito smanjuje razina vode u jezeru, odnosno smanjuju se razlike

između razine vode u jezeru i moru, te produljuju razdoblja s negativnim gradijentima – prodorima zaslanjene morske vode u jezerski sustav.

3. PODLOGE I METODE

3.1. Opće napomene

Vransko jezero i njegov sliv čine složen hidrološki sustav, s problemima uzrokovanim klimatskim promjenama/varijacijama, ali i vrlo složenom strukturom i međuodnosima krškoga vodonosnika, jezerskoga sustava, mora i dotoka sa sliva. Oni značajnim dijelom nisu hidrološki osmotrivi, odnosno njihove se hidrološke značajke ne daju cjelovito mjeriti i precizno kvantificirati. Naime, unatoč postojanju hidroloških praćenja u slivu i na samom Vranskom jezeru (slika 3.1.), njegova vodna bilanca samo je dijelom hidrološki osmotriva – podzemni dotoci i istjecanja iz jezerskoga sustava nepoznati su. Ta je okolnost utjecala kako na izbor podloga, tako i na izbor metodologije provedenih obrada.

Slika 3.1.

Slika 3.1. Položaj Vranskoga jezera i Vranskoga polja s prikazom položaja mjernih postaja državnoga monitoringa: hidrološke postaje (1-Prosika/Vransko jezero, 2-Prosika/more, 3-Pakoštanski most/Vransko jezero, 4-Vrana/Lateralni kanal, 5-Burski most/Jablanski kanal, 6-Jankolovica/Glavni kanal, 7-Oporičev most nizv./Pećina, 8-Vrana/Škorobić, 9-Benkovac/Kličevica), mjesta uzorkovanja kakvoće vode (A-Prosika, B-Crkvine kod autokampa, C-Kotarka ušće) te klimatološka (KL-Biograd na moru) i kišomjerna postaja (KI-Stankovci)

Zbog toga su prilikom provedbi analiza u ovom radu korišteni različiti tipovi raspoloživih podloga: zabilježeni klimatološki i hidrološki podaci, kao i druge

informacije korištene za verifikaciju dobivenih rezultata. Prilikom istraživanja najviše su korišteni podaci s mjerno-osmatračkih postaja državnoga sustava monitoringa klimatoloških i hidroloških podataka koji provodi Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ) te podataka o kakvoći voda koje su u nadležnosti Hrvatskih voda. Dio podataka osiguran je i vlastitim mjerenjima i opažanjima, a korišteni su i podaci koje su osigurali djelatnici PP “Vransko jezero” i institucije s kojima oni surađuju.

3.2. Mjerno-osmatračke postaje i raspoloživi klimatološki i hidrološki podaci

Na slivnom području Vranskoga jezera postoji više aktivnih kišomjernih postaja s različitom kvalitetom prikupljenih podataka. Kod pojedinih postaja nedostaju neprekidni nizovi podataka zbog kraćih ili dužih prekida u radu, naročito od 1991. do 1997. godine zbog ratnih prilika. Za prikaz i analizu sadašnjega oborinskog režima Vranskoga jezera tako se mogu koristiti samo dvije kišomjerne postaje: postaja Biograd n/m koja je ujedno klimatološka postaja (s kotom od 8 m n. m.) te postaja Stankovci (170 m n. m.) (slika 3.1.). Obje postaje imaju povoljan prostorni položaj, pouzdane podatke i vrlo mali broj uglavnom kraćih prekida u radu. Raspoloživi podaci s klimatološke postaje Crkvine koja se nalazi najbliže Vranskomu jezeru i opremljena je i ispariteljem nisu se mogli koristiti zato što obuhvaćaju relativno kratko razdoblje mjerenja (1997.-2003.), a i njihova je pouzdanost vrlo upitna. U ovome su radu prilikom provedenih obrada korištene i digitalne karte prostornoga rasporeda srednjih godišnjih oborina i temperatura (s rezolucijom 700 x 700 m), dobivene iz podloga dokumenta DHMZ-a iz Zagreba (2002).

Na slivnome području Vranskoga jezera postoji ili je postojalo desetak hidroloških postaja. Neke od njih mijenjale su položaj i vrstu mjernih uređaja te imale

povremene prekide opažanja i mjerenja. Hidrološka mjerenja često su bila pod utjecajem promjena hidrauličkih uvjeta tečenja, uspornoga djelovanja razine vode Vranskoga jezera, razvoja bujne vegetacije u koritu, izvođenja regulacijskih radova i nekontroliranoga zahvaćanja vode iz korita. Od 1991. do 1995. motrenja su na većem dijelu postaja bila prekinuta zbog već spomenutih ratnih zbivanja. Stoga većina hidroloških postaja nema neprekinute nizove podataka zadovoljavajuće duljine i pouzdanosti.

Trenutačno je na slivu Vranskoga jezera aktivno devet hidroloških postaja s neprekinutim bilježenjem satnih vrijednosti vodostaja (slika 3.1.). Mjerenja protoka ne provode se samo na dvije hidrološke postaje: na postaji Prosika - Jadransko more koja djeluje kao mareograf i na postaji Pakoštanski most - Vransko jezero koja je pod usporom jezera. Na ostalim hidrološkim postajama protoke se mjere nekoliko puta godišnje ovisno o financijskim mogućnostima, hidrološko-hidrauličkim uvjetima, stanju vegetacije i sl. Točnost mjerenja protoka ili bilježenja vodostaja jako ovisi o uređenosti korita u mjernome profilu, kao i reguliranosti uzvodnoga i nizvodnoga poteza vodotoka.

Za napomenuti je da je prilikom analiza za potrebe ovog doktorskog rada utvrđeno da su službeni podaci o kotama "0" vodokaznih letava DHMZ-a na jezeru i moru dijelom pogrešni. Uzroci su tome sustavne greške koje imaju poligoni vlakovi s kojih su provođena dosadašnja određivanja položaja kota "0" vodokaznih letava, a moguće je da su prisutne i slučajne pogreške prilikom povezivanja položaja kota "0" vodokaznih letava s podacima državne izmjere. Stoga su ti službeni podaci dijelom ispravljani na osnovi informacija vezanih uz kontrolna geodetska snimanja pojedinih geodetskih institucija. Premjer prostora Vranskoga jezera, odnosno batimetrijski snimak dna proveden je (Teodolit, 2012) s visinskim međudnosima temeljenima na

podatku o koti vodokazne letve na Prosiki od -0,0057 m n. m. kolika je i po podacima DHMZ-a. Potvrda te kote dobivena je i najnovijom geodetskom provjerom koju je 22. srpnja 2014. provela tvrtka Geodata iz Splita. Tom je prilikom kao kota „0“ letve utvrđena nadmorska visina od -0,066 m n. m., pri čemu je točnost mjerenja iznosila +/- 4 mm. S obzirom na tu točnost kao i apsolutnu razliku od svega 9 mm u odnosu na ranije informacije o toj koti, u ovome je doktorskom radu prilikom provedenih analiza kota položaja „0“ usvojena s nadmorskom visinom od -0,06 m n. m. Odnosno, u centimetarskoj skali točnosti kolika je i točnost vodokaznih očitavanja, kota nije mijenjana u odnosu na ranija saznanja.

Veće su razlike utvrđene prilikom određivanja kota „0“ vodokaznih postaja Pakošanski most – Vransko jezero i mareografa Prosika - Jadransko more. Podaci relativnih očitavanja vodostaja s tih postaja svedeni su na apsolutne razine na osnovi rezultata geodetske kontrole koju je u srpnju 2014. godine također provela tvrtka Geodata. Tom su se prilikom korigirale i neke ranije grube pogreške u očitavanju vodostaja do kojih je došlo zbog spomenutog problema s nepoznavanjem visinskog položaja „0“ mjerodavnih vodokaznih letava. Sigurno je da je za upravljanje sustavom Vranskoga jezera i njegovim vodnim resursima jedan od prioritarnih budućih zadataka točno utvrđivanje visinskih odnosa na čitavome prostoru jezera i Vranskoga polja na kome je izgrađen hidrotehnički hidromelioracijski sustav.

Osnovne informacije o hidrološkim postajama i njihovu radu sadržane su u tablici 3.1. Vidljivo je da se razine vode Vranskoga jezera prate na dvjema lokacijama na dva suprotna kraja (Prosika i Pakošanski most). Pritom razlike razina uslijed djelovanja vjetra mogu u pojedinim prilikama iznositi i više od deset centimetara. Na Pakošanskom mostu prati se, zapravo, razina vode u kanalu Kotarki koja je pod

izrazitim utjecajem uspora jezera. Zbog toga, osim pri pojavama velikih voda, razlika razina vode u jezeru i kanalu praktički i nema.

Tablica 3.1. Osnovne informacije o hidrološkim postajama DHMZ-a na širem prostoru Vranskoga jezera s podacima o praćenju hidroloških veličina

Redni broj/ Praćenje	Ime postaje	Vodno tijelo	Početak vodokaznih opažanja	Početak limnigrafskih opažanja	Kota "0" vodokaza po DHMZ-u (m n.m.)	Kontrola kote "0" po Geodati (2014) (m n.m.)	Napomene
1 H, Q	Prosika	Vransko jezero	1.1.1948.	6.8.1971.	- 0,0057	- 0,066	Usvojena kota - 0,06 m n.m.
2 H	Prosika	Jadransko more	1.1.1948.	1.11.1986.	0,002	- 0,171	Vodokaz ukinut 1974.g. – bio na drugoj lokaciji
3 H	Pakoštanski most	Vransko jezero (Kotarka)	1925./podaci od 1929.-1939. Rek. 29.8.1946.	9.10.1995.	- 0,165	- 0,161	
4 H, Q	Vrana	Lateralni kanal	14.10.1995.		Nije određena		
5 H, Q	Burski most	Jablanski kanal	1.1.1986. Rek. 11.10.1995.	11.10.1995.			
6 H, Q	Jankolovica	Glavni kanal (Kotarka)	1968.-1969. Rek.1.1.1987.	1.1.1987.			Protoke 1997.-2005.
7 H, Q	Oporičev most nizv.	Pećina	1.1.1987.- 31.12.1995. 20.10.1995.	20.10.1995.			Pri obnovi 1995. promijenjena lokacija

8 H, Q	Vrana	Škorobić	20.10.1995.		
9 H, Q	Benkovac	Kličevica	1.9.1988.	1.1.2003.	

Obrazloženje simbola u tablici: (H-vodostaji, Q- protoke)

Pri hidrološkim kontrolama, obradama i nadopunjavanju nedostajajućih podataka sa sliva Vranskoga jezera dijelom su korišteni podaci sa susjednih slivova, ali i sa širega regionalnog prostora sjevernojadranskoga i dalmatinskog krškog područja, kao i mareografski podaci Hrvatskoga hidrografskog instituta s postaja Split – Luka i Split – Marjan.

Obrađeni podaci s pojedinih postaja uglavnom su bili vezani za cjelovita razdoblja od kad postoje raspoloživi podaci do zaključno 2012. Kod nekih postaja uzimani su za analizu i podaci iz kraćih raspoloživih razdoblja homogenih vremenskih serija zbog problema s prekidima u motrenju kao i zbog značajnih promjena hidroloških uvjeta (primjerice, zbog promjene kote istjecanja voda iz Vranskoga jezera izgradnjom praga na Prosiki 2009.).

3.3. Praćenje kakvoće vode Vranskoga jezera

Praćenje kakvoće vode Vranskoga jezera u mreži državnoga monitoringa ima relativno dugu tradiciju s nizom motrenja koja traje do današnjih dana. Hrvatske vode organiziraju provedbu monitoringa i vode bazu podataka s rezultatima provedenih uzorkovanja i rezultatima njihovih analiza. Godine 1982. započela su motrenja kakvoće vode na mjernoj postaji Vransko jezero – Autokamp (kasnije mijenjani nazivi u Motel te Crkvine kamp) smještenoj na sjeverozapadnoj strani jezera. Ovisno o hidrološkim prilikama, ispred spomenutoga autokampa dubina vode u jezeru je

između 1 i 2 m (lokalitet B na slici 3.1.). Za tu su postaju dijelom opažanog razdoblja provedena uzorkovanja na tri različite dubine - s površine jezera (takva se uzorkovanja odvijaju i danas), na dubini od 1 m ispod jezerske površine (provedeno do 1999.) te uzorkovanja s dna jezera (do 1991.). Također, 1982. započela su i sustavna praćenja kakvoće vode na lokalitetu Kotarka most (lokalitet C na slici 3.1.) gdje se uzorkovanjem s površine prati kakvoća vode Vranskoga jezera na ušću kanala Kotarke. Kako su problemi vezani uz utjecaj prodora mora u vodni sustav Vranskoga jezera najizrazitiji na suprotnom kraju jezera od spomenutih postaja, 2000. je uspostavljena i postaja Prosika (lokalitet A na slici 3.1.). Na toj se postaji prate podaci o rezultatima uzorkovanja uzetih s površine jezera neposredno uzvodno od početka kanala Prosika. Za napomenuti je da je od 1991. do 1996. praćenje kakvoće vode u jezeru prekinuto zbog ratnih prilika.

Tijekom spomenutoga 30-godišnjeg razdoblja motrenja dolazilo je do promjena kako u učestalosti uzorkovanja, tako i u pogledu izbora pokazatelja te u analitici laboratorijskih obrada, pa čak i u granicama određivanja pojedinih pokazatelja. Uzorkovanja su se najčešće provodila dvanaest puta godišnje, nekih godina i samo četiri puta godišnje, a tijekom 2012., posljednje godine uključene u ovaj doktorski rad, uzorkovanja na spomenutim lokalitetima provedena su šest puta. Na svim se postajama prate fizikalno-kemijski pokazatelji (temperatura vode, pH vrijednost, el. vodljivost, ukupne suspendirane tvari, alkalitet te ukupna i kalcijeva tvrdoća), režim kisika (otopljeni kisik, zasićenje kisikom, BPK5 i KPK-Mn), hranjive tvari (različiti spojevi dušika i fosfora), ioni (kalcija, magnezija, kloridi, sulfati i silikati), a na lokalitetu Vranskoga jezera kod autokampa/motela i biološki pokazatelji (klorofil-a). Tijekom ranijih razdoblja uzorkovanja povremeno se pratio i niz drugih kemijskih pokazatelja.

Cjelovita obrada kakvoće voda Vranskog jezera nije bila predmet analiza u ovom doktorskom radu pa su od spomenutih podataka korišteni samo podaci o elektroprovodljivosti i sadržaju klorida. Za napomenuti je da se od 2008. do danas u organizaciji stručne službe PP Vransko jezero također organizirano provode praćenja pojedinih parametara kakvoće vode, i to na trima mjestima u jezeru: P-2 (pred ušćem Kotarke), P-4 (sredina jezera) i P-6 (Prosika). Od 2008. do 2009. pratila se kakvoća na mjestu P-7 (Živača). Tu je zamjetan jači podzemni dotok u vidu vrulje u jezeru, ali kako se nije pokazala razlika između zabilježenih vrijednosti na tom mjestu u odnosu na P-4, ta su uzorkovanja prekinuta u siječnju 2010. U okviru toga monitoringa, s učestalošću od oko jednom mjesečno, prate se elektroprovodljivost, sadržaj klorida te salinitet, kao i više drugih elemenata koji nisu analizirani u okviru ovog dokorskog rada. Za spomenuti je da su određene pokazatelje kakvoće voda pratile i pojedine istraživačke institucije, poglavito Prirodoslovno-matematički i Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, u okviru vlastitih istraživačkih programa. Njihovi su podaci i rezultati, uz vlastite podatke provedenih uzorkovanja, također dijelom korišteni u ovome doktorskom radu.

3.4. Obrade vremenskih nizova klimatoloških i hidroloških podataka

Osnovnu statističku analizu provedenu u ovome doktorskom radu čini određivanje karakterističnih statističkih pokazatelja vremenskih serija podataka. Pritom se analiziraju dva tipa parametara – mjere središnjega okupljanja (sredina, medijana, mod..) i mjere rasipanja (raspon, statistički momenti, standardno odstupanje, koeficijenti varijacije, asimetrije...) (Salas i sur., 1990; Šošić, 2004).

Način, odnosno vjerojatnost, s kojom neka hidrološka varijabla poprima pojedine vrijednosti, u statistici se opisuje funkcijama raspodjele vjerojatnosti (Krešić,

1991). Postupak analize vjerojatnosti pojedinih hidroloških veličina sastoji se u pronalaženju teorijske funkcije raspodjele koja se najbolje prilagođava iskustvenoj funkciji raspodjele za raspoložive mjerene podatke iz analiziranoga uzorka. Izborom takve teorijske funkcije i proračunom potrebnih parametara te raspodjele na osnovi izmjerenih podataka, određuje se vjerojatnost pojavljivanja odabranih vrijednosti hidroloških veličina. U ovome doktorskom radu korištene su slijedeće teorijske funkcije raspodjele: Gauss, Galton, Gumbel, Pearson III, GEV i Log-Pearson III. One se i inače redovito koriste u praktičnoj hidrologiji. Testiranje dobrote njihova prilagođavanja iskustvenoj raspodjeli provedeno je također standardnim statističkim testovima, χ^2 testom te testom Smirnov-Kolmogorova.

Vremenske serije hidroloških podataka analizirane su i u smislu odnosa između pojedinih članova istih ili uspoređenih serija, i to počevši od analize pokretnih (kliznih) prosjeka, utvrđivanja pojavljivanja trendova unutar tih serija, pa do analiza autokorelacije i kroskorelacije.

Homogenost dvaju različitih nizova hidroloških podataka, kao i nizova istvovrskih hidroloških podataka iz dvaju različitih razdoblja (primarni ili osnovni niz podataka s n_1 članova te sekundarni ili modificirani niz podataka s n_2 članova) analizirana je primjenom Wilcoxonovog (1945) neparametarskog testa (testa rangiranja) koji je zbog svoje objektivnosti i jednostavnosti pogodan za takve ocjene (Žugaj, 2000).

Mjerilo za ocjenu homogenosti je standardna jedinična devijacija U_0 koja se određuje prema jednadžbi (3-1):

$$U_0 = \frac{S_0 - E(S)}{\sigma_S} \quad (3-1)$$

gdje je: S_0 - suma rangova modificiranog niza koja se računa po formuli (3-2):

$$S_0 = \sum_l^{n_2} k_j \quad (3-2)$$

gdje je k_j rang člana modificiranog niza kada se članovi modificiranog

i originalnog niza poredaju po veličini,

$E_{(s)}$ - očekivana vrijednost sume rangova modificiranog niza koja se računa po

jednadžbi (3-3):

$$E_{(s)} = \frac{n_2(n_1+n_2+1)}{2} \quad (3-3)$$

σ_s - standardna devijacija sume rangova modificiranog niza, koja se računa po

formuli (3-4):

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12}} \quad (3-4)$$

Pri ocjeni se nultoj pretpostavci – da nema značajnih promjena u podacima, suprostavlja alternativna pretpostavka – da postoje značajne promjene uzrokovane prirodnim ili umjetnim značajkama. Uz uvažavanja razine povjerenja od $\alpha=0,05$ donja i gornja granica prihvaćanja nulte pretpostavke (jednadžba (3-5)) usvajaju se prema normalnoj raspodjeli (Žugaj, 2000):

$$\left(U_{\frac{1}{2}\alpha} = -1,96\right) < U_0 < \left(U_{1-\frac{1}{2}\alpha} = +1,96\right) \quad (3-5)$$

Trendovi se definiraju kao sustavna i neprekinuta promjena kroz cijeli uzorak vremenske serije, isključujući periodične ili gotovo periodične promjene. Razlog iskazivanja trenda su promjene jednoga ili više parametara serije, nastalih uslijed faktora koji su izvan očekivanih varijacija zbog načina osnivanja uzoraka stacionarnih stohastičkih procesa (Jevđević, 1974). Najčešće se radi o linearnom trendu, koji je analiziran i u slučaju Vranskoga jezera.

Međusobna zavisnost uzastopnih članova istoga vremenskog niza tijekom određenoga vremenskog razdoblja u ovome je doktorskom radu analizirana korištenjem autokorelacijske analize. Na osnovi oblika korelograma, odnosno **autokorelacijske funkcije** AKF koja se osniva od nizova vrijednosti koeficijenata autokorelacije r_k , mogu se utvrditi periodičnosti u pojavama analiziranoga hidrološkog niza, kao i tromost – „pamćenje“ sustava. To u ovome slučaju provedbe analiza nizova podataka o protokama krških izvorišta ukazuje na brzinu njihovih odgovora s obzirom na promjenu uvjeta, a time i na akumulativnost njihovih vodnih zaliha. Vrijednost koeficijenta autokorelacije r_k dana je jednadžbom (3-6):

$$r_k = \frac{COV(x_i, x_{i+k})}{VARx_i} = \frac{\frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x})}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (3-6)$$

gdje je:

$COV(x_i, x_{i+k})$ - kovarijanca između „mirujućeg“ i „posmičnog“
niza
podataka

- N - ukupan broj podataka uzorka
- k - korak autokorelacije
- \bar{x} - srednja vrijednost osnovnoga (cijelog) niza

Prema Manginu (1984), kao referentna vrijednost, odnosno donji prag značajnosti koeficijenta autokorelacije uzima se vrijednost 0,2. Jukić (2004) preporuča da se, uslijed nestacionarnosti vremenskih serija, analiziraju što dulje vremenske serije, a da kod izračunatih AKF ima smisla analizirati samo prvi, pozitivni dio funkcije.

Dodatna saznanja o značenju povezanosti vremenskih serija hidroloških podataka pruža kroskorelacijska analiza, pri čemu se obično analizira povezanost ulazne i izlazne serije podataka u neki hidrološki sustav. Vrijednosti **kroskorelacijske funkcije** (KKF), odnosno koeficijenti kroskorelacije se, analogno kao kod AKF, određuju između dva analizirana niza, koji se pomiču za korak k , prema izrazu (3-7):

$$r_k = \frac{COV(x_i y_{i+k})}{\sigma(x_i) \cdot \sigma(y_{i+k})} \quad (3-7)$$

gdje su:

- $COV(..)$ - kovarijaca između ulaznoga niza (primjerice oborina) x_i i izlaznoga niza (primjerice protok) y_{i+k} koji je pomaknut
- $\sigma(x_i), \sigma(y_{i+k})$ - standardno odstupanje devijacije preklopljenih dijelova niza/vremenskih serija podataka

Vrijednost vremenskoga koraka kod kojega KKF poprima svoju maksimalnu vrijednost odgovara brzini odgovora sustava koji se analizira.

Regionalne ovisnosti između pojedinih hidroloških parametara, provedene su uz pomoć uobičajenih hidroloških modela - jednostavnih linearnih ili nelinearnih regresija i višestruko regresijskih linearnih modela.

Opći oblik **modela jednostavne linearne regresije** svodi se na utvrđivanje analitičkoga izraza koji u određenome smislu najbolje predočava ulazne podatke – mjerene ili dobivene kao rezultate prethodno provedenih statističkih analiza. Prema Šošiću (2004), regresijska je jednadžba analitički izraz koji u smislu prosjeka opisuje odnos među pojavama. Zbog prirode hidroloških pojava kod kojih je linearnost uglavnom slabo izražena jednostavni linearni regresijski modeli se u vrlo malom broju slučajeva mogu primijeniti u regionalnim hidrološkim analizama. Puno češći slučaj je primjena modela jednostavne nelinearne regresije. U velikom broju slučajeva radi se zapravo o modelima kod kojih se prikladnom transformacijom varijabli provodi njihova linearizacija, čime se olakšava daljnji postupak određivanja nepoznatih parametara modela.

Višestrukoregresijskim modelima analitički se predočuje statistička kovarijacija jedne numeričke varijable pomoću dvije ili više drugih numeričkih varijabli. U hidrologiji se najčešće koristi model višestruke linearne regresije koji je dan u obliku izraza (3-8):

$$y_i = \alpha + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_j x_{ij} + \dots + \beta_k x_{ik} + u_i \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3-8)$$

U izrazu (3-8) x_{ij} su varijable, α stalni član regresijskog modela, $\beta_1 \dots \beta_k$ regresijski koeficijenti modela koji se proračunavaju nekom od metoda

procjenjivanja, a u_i rezidualno odstupanje. Do procjene navedenih vrijednosti regresijskoga modela dolazi se nekom od metoda procjenjivanja. Primjena metode najmanjih kvadrata sastoji se u traženju onih procjena parametara za koje rezidualni zbroj kvadrata doseže minimum. Prilikom primjene višestruko regresijskih modela općenito se nastoji da veza između ovisnih varijabli bude što čvršća, a međusobne veze neovisnih varijabli što slabije (Radić i sur., 1986).

3.5. Generiranje vremenskih nizova klimatoloških podataka do 2100. godine

Analize klimatskih utjecaja na vodni režim Vranskoga jezera provedene su, između ostaloga, i uz pretpostavku o ostvarenju mogućih scenarija klimatskih promjena/varijacija do 2100. godine. Osnove za to bile su klimatološke podloge koje su pripremili meteorolozi (Gajić-Čapka i sur. 2010, 2011) uključeni u EU projekt CCWaterS (<http://www.ccwaters.eu/>, Terzić i sur., 2011, Rubinić i sur., 2011a). U okviru toga projekta, na temelju raspoloživoga niza mjerenih podataka s glavne klimatološke postaje Zadar od 1951. do 2009. provedena je procjena srednjih godišnjih temperatura zraka i oborina za razdoblje od 2010. do 2100. Pritom su odabrane procjene, odnosno generirane vremenske serije srednjih godišnjih temperatura zraka i godišnjih količina oborina dobivene na osnovi dva regionalna klimatska modela – REGCM3 (Pal i sur., 2007) i Aladin (Bubnova i sur., 1995). Glavna klimatološka postaja Zadar odabrana je zato što ima pouzdan i neprekidan niz prikupljenih podataka za cjelokupno analizirano razdoblje nakon 1951. Ona je u provedenim obradama odabrana kao početna postaja, od Vranskoga jezera udaljena je oko 30 km te od granica njegova sliva samo desetak kilometara. Za dani je lokalitet

provedena usporedba podataka vremenskih nizova dobivenih neposrednim mjerenjem i nizova iz klimatološke baze E-OBS te je obavljena dodatna prilagodba modela na lokalna mjerenja. Klimatske promjene definirane su kao razlika između buduće klime (razdoblje P1: 2021.-2050. i razdoblje P2: 2071.-2100.) i referentne sadašnje klime (razdoblje P0: 1961.-1990.). Rezultati oba modela ukazuju na porast temperature na sve tri lokacije, dok trendovi količine oborina pokazuju znatno veću varijabilnost u smislu mogućega predznaka i iznosa promjene i to ovisno o modelu i sezoni (Gajić-Čapka i sur., 2011). Na slikama 3.2. i 3.3. dan je skupni prikaz osmotrenih i generiranih nizova srednjih godišnjih temperatura zraka, kao i godišnjih količina oborina za postaju Zadar za razdoblje (1951.-2100.) Uz to, dan je i iskaz rezultirajućih trendova za takve vremenske nizove, kao i karakteristični pokazatelji – srednje vrijednosti i standardno odstupanje za odabrana karakteristična 30-godišnja razdoblja P0, P1 i P2.

Pritom su, prilikom daljnjih obrada, proračunati rezultati generiranih serija za 2010. i 2011. zamijenjeni njihovim stvarno opaženim vrijednostima. Za provedbu daljnjih analiza – procjena utjecaja dobivenih klimatoloških promjena na hidrološke značajke (sr. god. dotok), odabrani su rezultati dobiveni po dva modela: REG CM-3 i Aladin. Uz zajedničku prisutnu tendenciju generalnoga smanjenja godišnjih količina oborina i povećanja srednjih godišnjih temperatura, ti rezultati imaju i relativno značajne razlike. S obzirom na to da je klimatološka postaja Zadar udaljena od sliva Vranskoga jezera svega oko 30 km, podaci s te postaje, odnosno spomenutim modeliranjima dobiven sintetički vremenski niz podataka oborinama i temperaturama, mogu se primijeniti i na slivu Vranskog jezera. Rezultirajući podaci 30-godišnjih prosjeka za razdoblje (1961.-1990.) s klimatološke postaje Zadar uspoređeni su sa srednjom godišnjom temperaturom zraka i srednjom godišnjom količinom oborina u

slivu Vranskoga jezera. Ti su podaci dobiveni preko digitalne karte njihova prostornoga rasporeda te su svedeni na sam sliv koeficijentom međuodnosa spomenutih veličina.

Rezultati provedenih procjena (Gajić-Čapka i sur., 2011) pokazuju, ovisno o primijenjenom modelu, i različite moguće promjene klimatskih prilika. Prema rezultatima dobivenima korištenjem modela REG CM-3, srednje godišnje temperature zraka u razdoblju (2021.-2050.) mogle bi porasti u odnosu na temperature tijekom razdoblja (1961.-1990.) za 8 posto, a tijekom razdoblja (2071.-2100.) čak za 22 posto u odnosu na referentno razdoblje. Kod prosječnih godišnjih količina oborina ne očekuju se nikave značajnije promjene (1-2 % porasta). Rezultati spomenutih procjena po modelu Aladin pokazuju da bi srednje godišnje temperature zraka tijekom razdoblja (2021.-2050.) mogle čak nešto naglašenije porasti u odnosu na referentno razdoblje - za oko 11 posto, dok je za razdoblje (2071.-2100.) dobivena praktički ista vrijednost porasta temperature od 22 posto. No, po modelu Aladin predviđa se smanjenje količina oborina u odnosu na prosječne količine oborina tijekom referentnog razdoblja, i to kod razdoblja (2021.-2050.) za 2 posto, a kod razdoblja (2071.-2100.) od 15 posto.

Slika 3.2.

Slika 3.2. Srednje godišnje temperature zraka za postaju Zadar - produljeno s modelom: a) RegCM3, b) Aladin, s ucrtanim vrijednostima prosječnog trenda kao i prosječnim vrijednostima i standardnim odstupanjima za tri referentna 30-godišnja razdoblja P0, P1 i P2 – (Gajić-Čapka i sur., 2010)

Slika 3.3.

Slika 3.3. Godišnje količine oborina za postaju Zadar - produljeno s modelom: a)RegCM3, b)Aladin, s ucrtanim vrijednostima prosječnog trenda kao i prosječnim vrijednostima i standardnim odstupanjima za tri referentna razdoblja P0, P1 i P2 – (Gajić-Čapka i sur., 2010)

3.6. Bilančna sagledavanja

Polazna postavka za bilanciranja i procjenu vodnoga potencijala nekoga slivnog područja je Brücknerova jednadžba vodne bilance (prema Dukić, 1984) koja daje odnos palih oborina P s jedne strane, te zbroja otjecanja R i evapotranspiracije E na drugoj strani:

$$P = R + E \quad (3-9)$$

Jednadžba (3-9) se najčešće prikazuje u svom proširenom obliku, tj. tako da se u razmatranja uključuju i promjene količine vodnih masa u vodonosniku sliva (ΔV) u odabranoj jedinici vremena. U tom slučaju ona glasi:

$$P - (R + E) = +/ - \Delta V \quad (3-10)$$

Postoje i različiti drugi načini proširenja bilančne jednadžbe (3-9). Njihova primjenjivost ovisi o stupnju poznavanja pojedinih komponenti otjecanja, gubitaka i uskladištenja u slivu (Lvovich, 1973; WMO, 1994). Vodna bilanca koja uključuje infiltraciju, evaporaciju i otjecanje je vrlo izražen nelinearan i prostorno varijabilan proces (Wood, 1995). Specifičnost krških slivova ogleda se u tome što im površina uglavnom nije jednoznačno određiva, te se do njene veličine dolazi, uz uvažavanje

hidrogeoloških značajki (rezultata trasiranja, geokemijskih značajki, geoloških značajki i sl.), hidrološkim iterativnim putem (Bonacci, 1987). U tom je kontekstu moguće odrediti pojedine elemente vodne bilance koji su nužni za procjenu vodnoga potencijala pojedinih slivnih područja jedino kombinacijom analize mjerenih podataka, kao i regionalnih formula. Primjena takvoga pristupa posebno je naglašena u priobalnim krškim sredinama zbog nedostatka odgovarajućeg sustava monitoringa dinamike kolebanja podzemnih voda i njihova istjecanja.

Pri spomenutom Bonaccijevom pristupu efektivne oborine su na primjerima dinarskoga krša određivane prema metodi Turca (1954). Postoje i drugi načini određivanja efektivnih oborina (oborina koje formiraju površinsko ili podzemno otjecanje) utemeljenih na klimatološkim značajkama analiziranoga slivnog područja. To su primjerice Palmerova (1965), ili pak u ovom doktorskom radu korištena Langbeinova metoda (1962). Ona je na području Hrvatske do sada relativno malo primjenjivana. Nabrojiti ćemo neke konkretne slučajeve: prilikom bilanciranja u slivu Mirne (Vodoprivreda Rijeka, 1991), prilikom bilanciranja dijela sjevernojadranskih slivova u okviru izrade Vodnogospodarske osnove Hrvatske (Hrvatske vode VGO Rijeka, 2001), istarskih slivova (Građevinski fakultet Rijeka, 2005) te slivova Vranskoga jezera (Građevinski fakultet Rijeka, 2009) i Krke (Građevinski fakultet Rijeka, 2011). Naime, u usporedbi s Turcovom metodom, upravo se Langbeinova metoda prilikom bilanciranja podataka na temelju 30-godišnjega referentnog niza (1961.-1990.), pokazala primjenjivijom za većinu testiranih slivova na području sjevernojadranskoga krša. Dodatno je modificirana za primjenu korištenjem GIS tehnologije (Horvat i Rubinić, 2003, 2006), gdje su sadržana i dodatna tumačenja vezana uz primjenu te metode.

Glavni koraci proračuna po modificiranoj Langbeinovoj metodi, mogu se svesti na sljedeće:

I. iteracija

- 1 - Definiranje slivova na temelju hidrogeološke razvodnice,
 - 2 - Prostorna raspodjela srednjih godišnjih oborina,
 - 3 - Prostorna raspodjela srednjih godišnjih temperatura zraka,
 - 4 - Proračun prostorne raspodjele očekivanog srednjeg godišnjeg otjecanja po slivovima / proračun prostorne raspodjele deficita otjecanja,
 - 5 - Proračun raspoloživih količina vode u slivu,
 - 6 - Usporedba dobivenih rezultata s regionalnim značajkama, te njihova verifikacija
- ili pristupanje II iteraciji.

II. iteracija

- Postupak kao u I. iteraciji, ali s promjenom nekoga od ulaznih parametara za što se pretpostavlja da postoje opravdani razlozi – primjerice popravci granica slivova ako se radi o krškom području te provjera i popravak i drugih ulaznih parametara i njihove prostorne raspodjele.

Koraci u okviru točaka 2 i 3 nužno su potrebni kada se ne raspolaže s dovoljno pouzdanim mjerenim podacima protoka pa se očekivano srednje godišnje otjecanje u slivu proračunava uvođenjem temperaturnoga faktora, ali se može provesti i na temelju nekih drugih, složenijih pristupa. Ako su za neki prostor na temelju mjerenih podataka dovoljno istraženi regionalni međuodnosi oborina i otjecanja, oni se neposredno uvode u proračun umjesto koraka 2 i 3.

Za proračun evapotranspiracije Langbeinova metoda koristi podatke o prostornoj raspodjeli oborina i temperatura, te se uz definiranje tzv. temperaturnoga faktora (jednadžba 3-8) na temelju iskustveno utvrđene funkcionalne veze toga faktora i palih oborina, određuju efektivne oborine, odnosno srednje godišnje otjecanje Q .

Proračun srednjega godišnjeg otjecanja temelji se na jednoznačnoj vezi između P/K i Q/K (Slika 3.4.) gdje je:

P – srednja godišnja oborina u slivu (cm),

Q – srednje godišnje otjecanje sa sliva (cm),

K – temperaturni faktor koji je izražen jednadžbom:

$$K = 10^{(0,0278T + 0,866)} \quad (3-11)$$

gdje je

T - prosječna godišnja temperatura u slivu ($^{\circ}C$)

Slika 3.4.

Slika 3.4. Odnos $Q/K = f(P/K)$ po Langbeinovoj metodi

Proračun otjecanja provodi se po jediničnom elementu prostornoga rastera. Kako su prostorne raspodjele oborina i temperatura zraka određene temeljem digitalnoga modela terena rezolucije 700 m, tako se i svi daljnji proračuni provode na

rasteru iste rezolucije. Kako u slivu Vranskoga jezera nema hidrološki jednoznačno odredivih razvodnica podslivova pojedinih hidroloških postaja, a isto tako niti jedna postaja nema raspoloživ 30-godišnji niz podataka za referentno razdoblje (1961.-1990.), samo je testiranje provedeno i s dodatnim testiranjem na primjeru desetak istarskih slivova s vrlo sličnim hidrološkim prilikama. Pritom su se u obzir uzeli rezultati regionalno provedenih testova u radu Horvat i Rubinić (2006) gdje je utvrđeno vrlo dobro podudaranje srednjih godišnjih protoka dobivenih na temelju izmjerenih podataka i proračunanih vrijednosti po Langbeinovoju metodi (slika 3.5.). Najveće razlike utvrđene su kod postaja za koje postoje razlozi za odstupanja - gubici u koritu, precrpljivanja voda iz drugih slivova, oduzimanje voda za vodoopskrbu, neprecizna mjerenja u području velikih voda...

Slika 3.5.

Slika 3.5. Testiranje primjene Langbeinove metode na odabranim slivovima hidroloških postaja u Istri - međuodnos srednjih godišnjih protoka određenih na osnovi mjerenja i proračunatih vrijednosti po Langbeinovoju metodi za referentno 30-godišnje razdoblje (1961.-1990.)

Prilikom bilanciranja, odnos efektivnih Q i palih oborina P , odnosno njihovih rezultirajućih volumena V_Q i V_P , izražen je koeficijentom otjecanja C :

$$C = V_Q / V_P \quad (3-12)$$

Prema Denić-Jukić (2002), u njegovoj su veličini objedinjeni svi procesi prisutni na promatranome području tijekom promatranoga razdoblja. Koeficijent otjecanja izražava utjecaj evapotranspiracije, zadržavanja i zapunjavanja depresija,

promjene deficita vlage u tlu i ostalih svojstava sliva na proces otjecanja. Prema Bonacciju (2000, 2001), vrijednosti koeficijenta otjecanja, kao i njegove varijacije tijekom vremena mogu objasniti brojne pojave koje se odvijaju u nekome slivu. Stoga su rezultati provedenih obrada koeficijenata otjecanja dobiveni u radu uspoređeni s rezultatima provedenih obrada s postaja na širem regionalnom prostoru, kao i s rezultatima provedenih regionalizacija značajki pojedinih komponenti otjecanja (Žugaj, 1995; Soulios, 1984).

Vodna bilanca na razini mjesečnih podataka provedena je tako da su u obzir uzete specifičnosti hidrološkoga sustava Vranskoga jezera, odnosno to što zbog hidrološki nekontroliranih ulaza i izlaza iz sustava postoji problem ocjene dotoka i gubitaka iz sustava. Naime, u analiziranome primjeru Vranskoga jezera mjeri se samo dio dotoka koji u jezero ulazi putem hidrološki kontroliranih profila vodotoka, a ne mjere se podzemni dotoci i otjecanja duž njegova oboda i dna, isparavanja, pa ni količine voda koje se zahvaćaju za navodnjavanje. No, unatoč problemima u definiranju pojedinih komponenti otjecanja u slivu Vranskoga jezera, provedena je i detaljna analiza vodne bilance na mjesečnoj razini. Ideja je bila da se u situaciji u kojoj se ne mogu odvojiti nepoznati podzemni dotoci i podzemni gubici razmatraju zakonitosti ponašanja takve jedne sumarne komponente koja u sebi sadrži nepoznate odazive podzemlja. Naravno, ta komponenta može sadržavati i sustavne pogreške zbog loše kvantifikacije dijela ostalih bilančnih parametara - isparavanja s površine jezera, korištenja voda, pitanje pouzdanosti raspoloživosti hidroloških podataka o protokama s mjernih postaja s obzirom na uglavnom nepouzdana definirane protočne krivulje i drugo.

Analiza je provedena za razdoblje od siječnja 1997. do prosinca 2010. godine tijekom kojega su na raspolaganju stajali podaci hidroloških mjerenja te nije bilo

potrebe za njihovim nadopunjavanjem. Traženi parametar bilance - vrijednost „Ukupnih dotoka i gubitaka podzemnoga dotoka (ili) gubitka” ($Q_{UD/G}$) određena je prema slijedećoj jednadžbi (3.13.):

$$Q_{UD/G} = (Q_M + Q_J) - (Q_{JI} + Q_P + Q_K) \pm \Delta QV \quad (3-13)$$

gdje su:

- Q_M - ukupni dotoci mjereni na hidrološkim postajama na Vranskome polju ($m^3 s^{-1}$);
- Q_J - dotoci kao posljedica palih oborina na površinu jezera ($m^3 s^{-1}$);
- Q_{JI} - isparavanja s površine jezera ($m^3 s^{-1}$);
- Q_P - izmjerena istjecanja iz jezera u more na odvodnom kanalu Prosika ($m^3 s^{-1}$);
- Q_K - prosječno mjesečno korištenje voda u slivu Vranskog jezera za potrebe vodoopskrbe i procjenjene prosječne mjesečne količine zahvaćenih voda za navodnjavanje ($m^3 s^{-1}$);
- ΔQV - promjena dotoka zbog promjene volumena vode u samome jezeru tijekom analiziranog mjeseca ($m^3 s^{-1}$).

Stoga su, na osnovi provedenih analiza i navedenoga bilančnog modela, definirani nizovi sumarnih srednjih mjesečnih protoka koji u sebi sadrže i komponentu gubitaka vode u jezerskom sustavu. Radi se, dakle, o razlici ukupnih površinskih i

podzemnih dotoka te dotoka uslijed palih oborina na površinu jezera i podzemnih gubitaka vode kroz krški vodonosnik.

3.7. Metodologija inteligentne analize podataka

Složene procese i zakonitosti koje opisuju ponašanje prirodnih vodnih sustava u kršu vrlo je teško analizirati, a još je teže predviđati njihovo ponašanje u izmijenjenim uvjetima ukoliko se koriste jednostavni programski alati - matematički algoritmi i/ili standardni statistički postupci. Razvoj suvremenih tehnologija prikupljanja, pohranjivanja i pristupa podacima omogućio je ne samo napredak, već i značajan skok u analitici procesuiranja takvoga sve većega broja i vrsta podataka. Pritom više nije presudno, ponekad niti nužno, unaprijed pretpostavljati odnose uzročno-posljedičnih veza između pojedinih podataka te izdvajati elemente za koje se pretpostavlja da imaju naglašen utjecaj na ishode nekoga događaja ili procesa. Primjenom metoda inteligentne analize podataka moguće je istovremeno obrađivati veliku skupinu podataka unutar koje je moguće prepoznati određene pravilnosti, odnosno uzročno-posljedične veze između pojedinih podataka koji utječu na ishod nekoga događaja, izdvojiti takve situacije te iz njih izvući nova znanja o problematici i zakonitostima po kojima se te pravilnosti odvijaju.

Termin inteligentna analiza podataka (engl. *Intelligent Data Analysis*) sinonim je za termin uvriježen u engleskom jeziku kao *Data Mining (DM)*, koji se kod nas najčešće prevodi kao rudarenje podataka, dubinska analiza podataka ili dubinska pretraga podataka (Vranić, 2010). Pridjev “inteligentna” naglašava da je to analiza podataka zasnovana na postupcima umjetne inteligencije (engl. *artificial intelligence*), u prvom redu strojnog učenja (engl. *machine learning*). Umjetna inteligencija bavi se razvojem računarskih postupaka koji su u stanju računalima simulirati čovjekovo

(inteligentno) ponašanje. Strojno učenje se pak bavi važnim podskupom tih postupaka koje opisuje mogućnost učenja na osnovi prethodnoga iskustva. Prethodno iskustvo materijalizirano je u obliku povijesnih podataka, a rezultat učenja je najčešće model koji je moguće primijeniti u budućnosti kako bi se poboljšalo ponašanje (inteligentnoga računalnog) sustava. Otkrivanje znanja (engl. *knowledge discovery*) je proces koji nastaje integracijom postupaka strojnoga učenja i ekspertne čovjekove analize njegovih rezultata kako bi se otkrivalo i oblikovalo novo znanje (IRB, <http://lis.irb.hr/Prirucnik/prirucnik-otkrivanje-znanja.pdf>).

Radi se o heurističkome pristupu zasnovanome na postavkama induktivnoga učenja, generiranja pravila izvedenih iz analiziranih primjera međuodnosa istraživanih značajki nekoga sustava. Pritom metode strojnoga učenja predstavljaju računalni alat kojim se automatizira proces induktivnoga učenja, odnosno izdvajanja pravila koja se mogu generalizirati na istraživani skup podataka. Time se osigurava dodatno, novo znanje izvedeno iz istraživanoga skupa podataka.

Jedan od najpoznatijih modela za inteligentnu/dubinsku analizu podataka koji je i ovdje korišten je CRISP-DM (engl. *CRoss Industry Standard Process for Data Mining*). Prikazan je na slici 3.6. Ona dubinsku analizu podataka definira kao iterativni višefazni proces unutar kojega se, uobičajenim pristupima u svakoj od tih faza, stvaraju postavke rješavanja određenoga problema (<http://www.crisp-dm.org/CRISPWP-0800.pdf>).

Slika 3.6.

Slika 3.6. Osnovne faze procesa inteligentne analize podataka prema CRISP-DM standardu
(*Cross Industry Standard Process for Data Mining*) (<http://www.crisp-dm.org/CRISPWP-0800.pdf>)

Iako su sve faze prikazanoga modela inteligentne analize podataka podjednako važne za uspješnu primjenu novostečenoga znanja, s obzirom na u ovom doktorskom radu primijenjene metode inteligentne analize podataka, ističe se da faza modeliranja obuhvaća niz vrlo različitih modelskih tehnika. One su općenito vezane uz dva tipa problema - opisni (na osnovi analize podataka opisuju se svojstva istraživanoga sustava) i/ili prediktivni (predviđaju se vrijednosti varijable na temelju vrijednosti novih primjera ulaznih podataka). U tablici 3.2. prikazani su tipovi problema i tehnika kojima se oni rješavaju (IRB, <http://lis.irb.hr/Prirucnik/prirucnik-otkrivanje-znanja.pdf>).

Tablica 3.2. Prikaz tipova problema i tehnika njihova rješavanja (IRB, <http://lis.irb.hr/Prirucnik/prirucnik-otkrivanje-znanja.pdf>)

Tip problema	Tehnika rješavanja
Klasifikacija	Metode induciranja pravila, Stabla odlučivanja, Neuronske mreže,
Predikcija	Regresijske metode, Regresijska stabla,
Analize međuovisnosti	Korelacijska analiza, Asocijacijska pravila,
Opis i sumarni prikaz	Statističke metode,

Segmentacija	Tehnike segmentiranja (“clustering”), Neuronske mreže,
--------------	---

Ovdje su primijenjene dvije tehnike modeliranja – neuronske mreže i regresijska stabla odlučivanja. Pomoću njih bilo je moguće opisati i protumačiti stanje sustava hidrologije Vranskoga jezera te provesti prediktivne procjene ponašanja jezerskoga sustava u izmijenjenim klimatskim uvjetima.

U oba pristupa osnova je strojno učenje na povijesno zabilježenim podacima, odnosno dijelu podataka koji se naziva testni skup podataka (engl. *training set*). Na temelju njega se induktivnim učenjem, uz pomoć algoritma za učenje, stvara model. Taj se model testira na testnom skupu od n -primjera, odnosno povijesno zabilježenim podacima koji nisu korišteni pri treniranju modela, duljine obično 20 % od testnoga niza podataka. Ti povijesno zabilježeni podaci - vrijednosti (a_1, \dots, a_n) uspoređuju se s metodama strojnoga učenja predviđenim vrijednostima (p_1, \dots, p_n), pri čemu su \bar{a} i \bar{p} srednje vrijednosti niza zabilježenih, odnosno prognoziranih vrijednosti. Kao mjerilo uspješnosti modela uzimaju se različite mjere za ocjenu pogreške. U ovome slučaju gdje je za modeliranje korišten *WEKA* računarski alat za strojno učenje, kao mjerilo uspješnosti korišteni su sljedeći pokazatelji:

$$\text{- Koeficijent korelacije } r: \quad \frac{S_{PA}}{\sqrt{S_A S_P}} \quad (3-14)$$

gdje su:

$$S_{PA} = \frac{\sum_i (p_i - \bar{p})(a_i - \bar{a})}{n-1}, \quad S_P = \frac{\sum_i (p_i - \bar{p})^2}{n-1}, \quad S_A = \frac{\sum_i (a_i - \bar{a})^2}{n-1}$$

a pojedini članovi u danim jednadžbama:

n - broj članova niza

a_i - izmjerene vrijednosti

p_i - prognozirane vrijednosti

\bar{a} - prosječna vrijednost niza izmjerenih vrijednosti

\bar{p} - prosječna vrijednost niza prognoziranih vrijednosti

- Srednja apsolutna pogreška:
$$\frac{|p_1 - a_1| + \dots + |p_n - a_n|}{n} \quad (3-15)$$

- Korijen iz srednje kvadratne pogreške:
$$\sqrt{\frac{(p_1 - a_1)^2 + \dots + (p_n - a_n)^2}{n}} \quad (3-16)$$

- Relativna apsolutna pogreška:
$$\frac{|p_1 - a_1| + \dots + |p_n - a_n|}{|a_1| + \dots + |a_n|} \quad (3-17)$$

- Relativna kvadratna pogreška:
$$\frac{(p_1 - a_1)^2 + \dots + (p_n - a_n)^2}{(a_1 - \bar{a})^2 + \dots + (a_n - \bar{a})^2} \quad (3-18)$$

- Korijen iz relativne kvadratne pogreške:
$$\sqrt{\frac{(p_1 - a_1)^2 + \dots + (p_n - a_n)^2}{(a_1 - \bar{a})^2 + \dots + (a_n - \bar{a})^2}} \quad (3-19)$$

Kao što je spomenuto, za modeliranje odabranim tehnikama inteligentne obrade podataka - neuronskih mrežama i regresijskim stablima, korišten je *WEKA* programski alat za strojno učenje (<http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>). Radi se o

računarskom alatu zasnovanom na objektno orijentiranom JAVA programskom jeziku. On omogućava više različitih pristupa strojnom učenju i sadrži gotovo sve najvažnije algoritme strojnoga učenja (Hall i sur., 2009; Witten i Frank, 2000). Među ostalim, taj programski alat sadrži 76 klasifikacijskih/regresijskih algoritama i 8 algoritama za segmentiranje (<https://blog.itu.dk/SPVC-E2010/files/2010/11/wekatutorial.pdf>). Verzija *WEKA 3.7.10* omogućava i neposrednu prognozu vrijednosti istraživanih varijabli koje imaju značajke vremenskih serija. Takvi su i nizovi podataka o dotocima u jezerski sustav i sadržaju klorida u jezerskoj vodi.

3.8. Modeli neuronskih mreža (NN)

Neuronske mreže su jedna od tehnika i metoda umjetne inteligencije (engl. *artificial intelligence – AI*) koje nastoje oponašati način rada biološkoga mozga i putem senzora reagirati na okolinu (robotika), metodama rukovanja simbolima kreirati modele koji omogućuju obradu znanja na temelju pravila (ekspertni sustavi i dr.). Također mogu provoditi inteligentna izračunavanja (umjetne neuronske mreže, genetski algoritmi i slično).

Umjetna inteligencija nastala je u četrdesetim godinama prošlog stoljeća i vezuje se uz razvoj suvremenog računalstva. Unatoč toga što je prilično nova znanstvena disciplina, naslijedila je mnoge zamisli, pristupe i tehnike iz drugih disciplina – filozofije, matematike, logike, psihologije, a kod primjene modeliranja

neuronskih mreža čak i iz biologije. Početna godina razvoja metoda umjetne inteligencije obično se smatra 1943. Tada su MacCulloch i Pitts (1943) na temelju Jamesovih (1890) postavki u radu „Logički račun ideja svojstvenih aktivnosti živaca“ o djelovanju čovjekova mozga postavili jednostavan model umjetnoga neurona. Naziv „umjetna neuronska mreža“ koristi se da bi se opisale različite topologije u visokom stupnju međusobno jednostavnih procesnih elemenata (neurona) koje nude drugačiji pristup (paralelno procesiranje) uvriježenom pristupu računarstvu (serijska Von Neumannova računala). Osnovne su prednosti neuroračunala nad klasičnim masovni paralelizam pri procesiranju informacija, prilagodljivost i sposobnost učenja (Novaković i sur., 1998).

Neuronske mreže su metoda umjetne inteligencije nadahnuti i sastavljena prema ljudskom mozgu. Sličnost između bioloških i umjetnih neuronskih mreža ogleda se u načinu procesuiranja informacija. Biološki neuron (slika 3.7.) predstavlja živčanu stanicu koja prima informacije (ulazni signali u vidu električnih podražaja) od drugih neurona putem dendrita i obrađuje ih. Ovisno o ukupnom intenzitetu podražaja i pragu osjetljivosti, živčana stanica relaksira ili zadrži električni naboj. Stanica šalje svoj impuls putem aksona (izdanak tijeka živčane stanice kojim se prenosi podražaj) i sinapsi (mostovi između izdanaka aksoma i dendrita) drugim okolnim stanicama. Učenje se odvija promjenom jačine sinaptičkih veza. Pritom milijuni neurona u mreži mogu paralelno obrađivati informacije, a procijenjuje se da je broj mogućih veza između stanica za tri reda veličine veći od broja neurona (Kurtanjek, 2002).

Slika 3.7.

Slika 3.7. Shematski prikaz biološke živčane stanice/biološkoga neurona (Zekić-Sušac, 2006)

Umjetni neuron oponaša osnovno djelovanje biološkoga neurona. Tijelo biološkoga neurona zamjenjuje se sumatorom, ulogu dendrita preuzimaju ulazi u sumator, izlaz sumatora je aksom umjetnog neurona, a uloga praga osjetljivosti bioloških neurona preslikava se na tzv. aktivacijske funkcije (slika 3.8.).

Slika 3.8.

Slika 3.8. Struktura jednostavnoga umjetnog neurona po modelu MacCulloch i Pittsa – preuzeto od Novakovića i sur. (1998)

Funkcijske sinaptičke veze biološkoga neurona s njegovom okolinom preslikavaju se na težinske faktore, preko kojih se ostvaruje veza umjetnoga neurona s njegovom okolinom. Dakle, izlazi iz drugih neurona i/ili okruženja promatranoga neurona, koji se upućuju neuronu množe se težinskim faktorima. Težinski faktori rade isto ono što i sinapse kod biološkog neurona – povezuju izlaze iz okoline neurona, odnosno izlaze drugih neurona (aksona) s ulazima sumatora (dendriti). Intenzitet te veze ovisi o iznosu, a značajke veze o predznaku težinskoga faktora. Učenje se odvija promjenom vrijednosti “težina” među varijablama (težine w_{ji} su ponderi kojima se množe ulazne vrijednosti u neki “neuron”).

Sumator formira težinsku sumu svih ulaza. Njegov se izlaz sumatora povezuje na ulaz aktivacijske funkcije koja limitira amplitudu izlaznog signala neurona, a koja na svom izlazu producira izlaz umjetnog neurona. Iako mogu biti i linearne, aktivacijske funkcije su najčešće nelinearne, primjerice, tipa diskontinuitetnoga praga, složena aktivacijska funkcija s linearnim dijelovima, sigmoidalna, bipolarna... Nelinearne aktivacijske funkcije prevode izlaz sumatora na izlaz neurona preko

nelinearnoga pojačanja i dovode do sumatora koji na temelju dobivenih informacija generira izlaz. Ukoliko je izlaz sumatora veći od nekoga zadanog broja (praga osjetljivosti), izlaz je jedinica što odgovara ispaljivanju signala kod biološkog neurona. U suprotnom je izlaz neutrona nula – neuron nije aktivan (Novaković i sur., 1998).

Prva neuronska mreža napravljena je 1958. (Rosenblatt, 1958) na temelju zamisli perceptrona - umjetnoga neurona kojemu je aktivacijska funkcija u obliku praga osjetljivosti. No, desetak godina kasnije Minsky i Papert (1969) objavljuju rad u kojem oštro kritiziraju nedostatke perceptrona, što uzrokuje prestanak ulaganja u istraživanja neuronskih mreža. Ipak, šest godina kasnije javlja se višeslojna perceptronska mreža (Werbos, 1974) (slika 3.9.).

Ona predstavlja prvu verziju tzv. *backpropagation* mreže koja prevladava nedostatak perceptrona uvođenjem učenja u skrivenome sloju. No, Rumehallt i sur. (1986) usavršavaju *backpropagation* mrežu, čime se vraća ugled neuronskim mrežama jer time omogućuje aproksimiranje gotovo svih funkcija i rješavanje praktičnih problema. Otada se razvijaju brojni algoritmi za NN koji s pomoću različitih pravila učenja, ulaznih i izlaznih funkcija rješavaju probleme predviđanja, klasifikacije i prepoznavanja uzoraka.

Slika 3.9.

Slika 3.9. Prikaz strukture i koncepta višeslojne perceptronske mreže - a) strukturni graf s ulaznim i izlaznim slojem te dva skrivena sloja; b) prikaz rasprostiranja signala – unaprijedna propagacija funkcijskog signala i propagacija signala pogreške unazad (Parker, 1987)

Iz Slike 3.9. vidljiv je strukturni prikaz višeslojne perceptronske mreže (*MLP - MultiLayer Perceptron*). Sastoji se od više slojeva međusobno povezanih procesnih elemenata – čvorova ili neurona (perceptrona). Svi su čvorovi potpuno povezani – svaki neuron u svakom sloju povezan je sa svim čvorovima prethodnoga sloja. Ulazni signal pobuđuje ulazni dio mreže, te se dalje, prolazeći kroz pojedine neurone, širi do izlaza preuzimajući funkciju pojedinih izračuna funkcija ulaza i pripadajućih težina pridruženih tom neuronu. Na izlazu iz mreže obavlja korisnu funkciju, zbog čega se često naziva i funkcijski signal. Suprotan smjer putovanja ima signal pogreške koji se javlja kod izlaznoga čvora mreže i širi unatrag kroz pojedine slojeve. Naziva se signal pogreške zato što se njegov izračun u svakom neuronu temelji na nekom od oblika funkcije pogreške. Svaki skriveni sloj višeslojnoga perceptrona obavlja dvije vrste izračuna – izračun funkcijskoga signala koji se pojavljuje na njegovu izlazu, izražen u obliku kontinuirane nelinearne funkcije ulaznoga signala i sinaptičkih težina pridruženih tom neuronu te izračun procjene gradijenta pogreške u odnosu na težine povezane s ulazima neurona, a što je potrebno pri prolasku signala pogreške unatrag kroz mrežu (Parker, 1987).

Velik doprinos za razvoj višeslojnih neuronskih mreža dao je ruski matematičar Kolmogorov (1963) na primjeru troslojne neuronske mreže. U svom poznatom teoremu egzistencije dokazao je mogućnost aproksimacije mnogodimenzijskih nelinearnih funkcija putem neuronskih mreža, i to korištenjem jednodimenzionalnih nelinearnih prijenosnih – transfer funkcija. Time je ostvarena mogućnost da se razvojem višeslojnih neuronskih mreža mogu opisivati i vrlo različiti prirodni procesi koji imaju naglašenu nelinearnost.

Zbog velikih mogućnosti višeslojnih perceptrona, koje proizlaze iz uvažavanja nelinearnosti, radi se o vrlo prihvaćenom tipu neuronskih mreža. Na temelju njega

razvijeni su brojni programski paketi, pri čemu se neuronske mreže ne programiraju, nego uče na primjerima. Princip učenja neuronskih mreža je takav da im se „pokazuju“ primjeri i rješenja tih primjera. Računalo na temelju „treniranja“ u tim situacijama automatski može generirati iskustvena pravila (Dvornik, 2003), odnosno iterativnim putem stvoriti model postupnim učenjem na prethodnim podacima. U praksi to znači da je pri modeliranju nekoga procesa nužno dio raspoloživih podataka (obično veći dio) iskoristiti za učenje mreže, a dio, obično oko 10 – 20 %, iskoristiti za evaluaciju (validaciju) modela dobivenoga primjenom tako naučenih mreža (Lončarić, 2006).

U ovom je doktorskom radu korištena upravo takva višeslojna statička neuronska mreža s povratnim rasprostiranjem pogreške (engl. *feed forward – back propagation*). U nastavku je dan detaljan prikaz osnovnih značajki, odnosno postupka učenja i propagacije pogreške upravo takvoga tipa modela neuronskih mreža prema Bishopu (1995), Novakoviću i sur. (1998), te Milosavljeviću (2005).

Osnovni element svake neuronske mreže čini neuron čiji je model prikazan na slici 3.10. Njegovi su osnovni elementi:

1. skup sinaptičkih težina (w_{ij}),
2. sumator čija je funkcija ta da oblikuje težinsku sumu ulaza,
3. aktivacijska funkcija čija je funkcija da limitira amplitudu izlaznoga signala neurona.

Slika 3.10.

Slika 3.10. Osnovni nelinearni model neurona (Milosavljević, 2005)

Osnovni izrazi za takav tip modela su (3-20) i (3-21). Izraz (3-20) odnosi se na sumu umnožaka ulaza neurona i pripadajućih težinskih faktora veza, dok izraz (3-21) daje vrijednost izlazne vrijednosti neurona ovisno o rezultatu odnosa ulaznih impulsa na sumatoru, te o veličini praga i tipu i značajkama aktivacijske funkcije.

$$u_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j \quad (3-20)$$

$$y_k = a(u_k - \theta_k) \quad (3-21)$$

Grupiranjem pojedinačnih neurona u slojeve dolazi se do višeslojne mreže s prostiranjem signala unaprijed, a pogreške unatrag (slika 3.11.).

Slika 3.11.

Slika 3.11. Shema višeslojne mreže s prostiranjem signala unaprijed, a pogreške unatrag

(Milosavljević, 2005)

Postupak učenja (treniranja) svodi se na podešavanje težinskih koeficijenata veza između slojeva mreže kako bi se proračunati izlazi mreže što više približili poznatim vrijednostima izlaza. Uobičajeno je da se početne vrijednosti težina određuju generatorom slučajnih brojeva te da se oni u daljnjem postupku minimalizacije pogreške iterativno popravljaju. Na odabranom tipu neuronske mreže to učenje obavlja se u vidu učenja s učiteljem, odnosno pod nadzorom (slika 3.12.), tako da se za odabrani niz podataka nad kojim se provodi učenje mjereni podaci

uspoređuju s proračunatim vrijednostima izlaza. Opća shema pravila učenja prikazana je na slici 3.13.

Slika 3.12.

Slika 3.12. Učenje neuronske mreže s učiteljem (Milosavljević, 2005)

Slika 3.13.

Slika 3.13. Opća shema obučavanja i-toga neurona (Milosavljević, 2005)

Iz sheme na slici 3.13. je vidljivo da u povratnoj fazi učenja mreže na osnovi ostvarenoga izlaza mreže y_i i željenoga izlaza d_i proračunava pogrešku učenja. Kao mjerilo pogreške korišten je RMS pokazatelj (engl. *Root Mean Square Error*) – korijen iz srednje kvadratne pogreške. Na osnovi veličine te pogreške provodi se ispravak vrijednosti težinskih faktora veza. Pritom je vektor sinaptičkih težina i -tog neurona:

$$w_i = (w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{im})^r, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3-22)$$

a signal učenja u općem slučaju funkcija oblika:

$$r = f_r(w_i, x, d_i) \quad (3-23)$$

Ispravak pogreške provodi se ispravkom vrijednosti sinaptičkih težina prema općenitom izrazu (3-24):

$$\Delta w_i(t) = \eta r x(t) \quad (3-24)$$

gdje je η koeficijent brzine učenja kojim se osigurava promjena težinskih koeficijenata (parametara učenja) u smjeru najstrmijega (najvećeg mogućeg) pada ukupne pogreške, a njegova vrijednost najčešće se kreće između 10^{-3} i 10.

Korištenjem prethodno spomenutih izraza (3-23) do (3-24) dolazi se do izraza koji definira promjenu težinskih koeficijenata:

$$w_i(t+1) = w_i(t) + \eta f_r(w_i(t), x(t), d_i(t)) x(t) \quad (3-25)$$

Višeslojni perceptron (engl. *feed forward artificial neural networks - FFANN*) predstavlja jednu od najvažnijih neuronskih struktura koja ima i učinkovit BP algoritam propagacije pogreške unazad (engl. *backpropagation algorithm*). Na slici 3.14. dan je primjer jednostavnoga perceptrona s jednim skrivenim slojem.

Slika 3.14.

Slika 3.14. Višeslojni perceptron s jednim skrivenim slojem (Milosavljević, 2005)

Algoritam propagacije pogreške unazad sastoji se od sljedeće dvije faze:

1. u prvoj ulazni vektor propagira od ulaznog k izlaznom sloju definirajući izlaznu vrijednost signala $x^{(k)} y^{(k)}$ pri čemu se ne mijenjaju težine,

2. u drugoj fazi signal pogreške propagira unatrag od izlaznog k ulaznom sloju u cilju ispravke težina w_{ij} .

Ako se za primjer uzme par (x, d) iz zadanog obučavajućeg skupa te uvedu sljedeće oznake :

net_q - ulazni signal u neuron q u skrivenom sloju, pri čemu je:

$$net_q = \sum_{j=1}^m v_{qj} x_j \quad (3-26)$$

z_q - izlazni signal neurona q

$$z_q = a(net_q) = a\left(\sum_{j=1}^m v_{qj} x_j\right) \quad (3-27)$$

Tada je ulaz u i -ti neuron u izlaznom sloju dan je u obliku izraza (3-28):

$$net_i = \sum_{q=1}^l w_{iq} z_q = \sum_{q=1}^l w_{iq} a\left(\sum_{j=1}^m v_{qj} x_j\right) \quad (3-28)$$

Izlazi neurona u izlaznom sloju dani su izrazom (3-29):

$$y_i = a(net_i) = a\left(\sum_{q=1}^l w_{iq} z_q\right) = a\left(\sum_{q=1}^l w_{iq} a\left(\sum_{j=1}^m v_{qj} x_j\right)\right) \quad (3-29)$$

Izrazima (3-26) do (3-29) opisana je prva faza - propagacija ulaznoga signala.

Kriterijska funkcija učenja ima oblik (3-30):

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (d_i - y_i)^2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [d_i - a(\text{net}_i)]^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[d_i - a \left(\sum_{q=1}^l w_{iq} z_q \right) \right]^2 \quad (3-30)$$

U skladu s gradijentnim postupkom ekstremizacije, ispravak težina između skrivenoga i izlaznog sloja dana je izrazom (3-31):

$$\Delta w_{iq} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{iq}} \quad (3-31)$$

odnosno uzimajući u obzir prostiranje signala unaprijed i lančano pravilo parcijalnih derivacija za $\frac{\partial E}{\partial w_{iq}}$, proizlazi:

$$\Delta w_{iq} = -\eta \left[\frac{\partial E}{\partial y_i} \right] \left[\frac{\partial y_i}{\partial \text{net}_i} \right] \left[\frac{\partial \text{net}_i}{\partial w_{iq}} \right] = \eta [d_i - y_i] [a'(\text{net}_i)] [z_q] \stackrel{\Delta}{=} \eta \delta_{0i} z_q \quad (3-32)$$

gde je s δ_{0i} označen signal pogreške:

$$\delta_{0i} = -\frac{\partial E}{\partial \text{net}_i} = -\left[\frac{\partial E}{\partial y_i} \right] \left[\frac{\partial y_i}{\partial \text{net}_i} \right] = [d_i - y_i] [a'(\text{net}_i)] \quad (3-33)$$

dok je:

$$a'(net_i) = \frac{\partial a(net_i)}{\partial net_i} \quad (3-34)$$

Ispravak težina između neurona j u ulaznom i neurona q u skrivenom sloju je dan s:

$$v_{qj} = \eta \left[\frac{\partial E}{\partial v_{qj}} \right] = -\eta \left[\frac{\partial E}{\partial net_q} \right] \left[\frac{\partial net_q}{\partial v_{qj}} \right] = -\eta \left[\frac{\partial E}{\partial z_q} \right] \left[\frac{\partial z_q}{\partial net_q} \right] \left[\frac{\partial net_q}{\partial v_{qj}} \right] = \eta \sum_{i=1}^n [(d_i - y_i) a'(net_i) w_{iq}] a'(net_q) x_j \quad (3-35)$$

Korištenjem izraza za signal pogreške δ_{0i} , dobiva se:

$$\Delta v_{qj} = \eta \sum_{i=1}^n [\delta_{0i} w_{iq}] a'(net_q) x_j = \eta \delta_{hq} x_j \quad (3-36)$$

gde je δ_{hq} signal pogreške za neuron q u skrivenom sloju. Definira se prema izrazu (3-37):

$$\delta_{hq} = -\frac{\partial E}{\partial net_q} = -\left[\frac{\partial E}{\partial z_q} \right] \left[\frac{\partial z_q}{\partial net_q} \right] = a'(net_q) \sum_{i=1}^n \delta_{0i} w_{iq} \quad (3-37)$$

gde je ulaz u neuron q .

Izraz za δ_{hq} pokazuje da se ovaj signal pogreške za neuron q u skrivenome sloju dobiva propagacijom unazad od izlaznoga sloja signala pogreške δ_{0i} pridruženih izlaznim neuronima. Ova se razmatranja mogu proširiti na perceptron s proizvoljnim brojem slojeva. Općenito, za proizvoljan broj slojeva, pravilo ispravka težina u algoritmu propagacije pogreške unazad ima oblik (3-38):

$$\Delta w_{ij} = \eta \delta_i x_j = \eta \delta_{output-i} x_{input-j} \quad (3-38)$$

gdje se „output-i“ i „input-j“ odnose na dva kraja spoja neurona j ka neuronu i .

Problem je što se u postupku konvergencije pogreške nailazi na velik broj lokalnih minimuma jer postoji velik broj kombinatornih permutacija težina koje daju isti izlaz mreže. Ti lokalni minimumi uzrokuju sporu konvergenciju algoritma propagacije pogreške unazad. No, postoje i određeni čimbenici s kojima se pri učenju takvih tipova neuronskih mreža (s propagacijom pogreške unazad) može utjecati na brzinu konvergencije. Iznos ispravka težine proporcionalan je parametru η koji određuje brzinu učenja – ako je on premalen, učenje je sporo. Prevelika brzina učenja može pak biti uzrok nestabilnosti.

Na Zuradin (1992) prijedlog, brzina učenja može se ispraviti uz pomoć momentuma - dodatnoga inercijskog člana koji omogućuje odvijanje procesa obučavanja u pravcu „srednje sile na dole“. Ovo se može ostvariti uključivanjem prethodnih promjena težina u trenutnu promjenu, i to najčešće modifikacijom delta pravila, primjerice na sljedeći način:

$$\Delta w(t) = -\eta \nabla E(t) + \alpha \Delta w(t-1), \quad \alpha \in [0,1] \quad (3-39)$$

gdje je parameter α momentum, a njegova se praktična vrijednost uzima između 0,1 i 0,9.

Određivanje broja neurona u skrivenom sloju posebno je značajno jer se nezaobilazno javlja gotovo u svakoj primjeni višeslojnoga perceptrona. U tom smislu ne postoji egzaktni odgovor, već se uglavnom do njega dolazi heuristički. Praktične preporuke svode se na princip pokušavanja sa znatno manjim početnim brojem neurona u skrivenom sloju od dimenzije ulaznog sloja. Ako je obučavanje zadovoljavajuće, vrijedi pokušati s daljnjim smanjivanjem. U suprotnome, nužno je postupno povećavati njihov broj.

U izvedbi BP algoritma, učenje se odvija uzastopnim prezentiranjem parova za treniranje, pri čemu se jedna prezentacija svih parova za treniranje, odnosno broj slučajeva koji će se obraditi u jednoj iteraciji, naziva epoha. Učenje se odvija epohom dok se srednja kvadratna pogreška dovoljno ne smanji i dok se težine i pragovi mreže ne stabiliziraju.

Testiranje uspješnosti modeliranja korištenom neuronskom mrežom provodi se upotrebom nekoliko pokazatelja koji su opisani u poglavlju 3.7.

Zaključno, BP algoritam širenja pogreške unazad može se opisati kroz sljedeće korake (Zekić-Sušec, 2006):

1. Prolazak kroz podatke - mreža uzima informacije o ulazu, te nastoji sama predvidjeti izlaz na tim podacima. Mreža zatim uspoređuje svoj rezultat sa stvarnim izlazima i računa pogrešku.
2. Prolazak kroz podatke - mreža se ispravlja uzimajući informacije o pogrešci izračunatoj u prethodnom koraku tako da funkciju pogreške ugrađuje u ulazne vrijednosti neurona i ponovo računa izlaze, kao i novu pogrešku.

3. Ponavljanje koraka 2 mnogo puta sve dok pogreška ne bude prihvatljiva.
4. Testiranje mreže na drugom uzorku podataka i računanje pogreške na njima. Ta se pogreška uzima kao mjerilo ocjenjivanja mreže.
5. Upotreba mreže na novim, budućim vrijednostima za koje nisu poznati izlazi.

Pri projektiranju mreže, odnosno modeliranju nekoga procesa, uz postojanje niza podataka za učenje/trening odabranoga tipa višeslojne neuronske mreže s povratnim rasprostiranjem pogreške, potrebno je odrediti i parametre mreže: broj skrivenih neurona, konstantu učenja i konstantu inercije – momentum.

Neuronske mreže tijekom posljednja dva desetljeća sve više postaju nezaobilazan alat u rješavanju brojnih problema pa se tako i neki vodnogospodarski problemi nastoje riješiti primjenom neuronskih mreža. Za sada je to uglavnom istraživačko područje njihove primjene, posebno što se tiče hidrologije i upravljanja vodnim zalihama u kršu. No, budući da to može biti moćan aproksimator višedimenzionalnih funkcija, nesumnjivo je da će i u tome području zaživjeti i primjena neuronskih mreža. Naime, s obzirom na potrebu za definiranjem složenih determinističkih procesa nekim prihvatljivim matematičkim modelom, ili je pak takav model složen i zahtijeva dosta računarskoga vremena, moguća je primjena neuronskih mreža. Pogotovo se to odnosi na pitanje prognoza ponašanja složenih sustava s vrlo visokim stupnjem nelinearnosti (kakvi su i vodni sustavi), koji obično imaju jaku determinističku komponentu, no koju je najčešće vrlo teško matematički formalizirati (Pal i Srimani, 1996). U takvim slučajevima najprikladnije je rješavanje problema u

obliku modela crne kutije (engl. *black-box*), kakve su u suštini upravo neuronske mreže.

Prema Salasu i sur. (2000), počeci primjene neuronskih mreža u području vodnog gospodarstva vezani su za devedesete godine prošloga stoljeća, i to u vrlo širokom području – području pročišćavanja otpadnih voda (Capodaglio, 1991), predviđanju promjena kakvoće voda/saliniteta (Dandy i Maier, 1993), prognozi dnevnih potreba za vodom (Zhang i sur., 1993), prognozi protoka (Zhu i Fujita, 1993; Lachtermacher i Fuller, 1993), proračunu jediničnoga hidrograma (Hjelmfelt i drugi, 1993), modeliranju dnevnih procesa oborina-otjecanje (Hsu i drugi, 1995; Shamseldin, 1997; Tokar i Johnson, 1999), predviđanju oborina (French i drugi, 1992), prognozi obnovi kakvoće podzemnih voda (Roger i Dowla, 1994, Rizzo i Dougherty, 1994), kao i u prognozi kakvoće voda (Maier i Dandy, 2000). Tijekom posljednjih godina umjetne neuronske mreže sve se više počinju primjenjivati i u domeni podzemnih voda, posebno vezano uz miješanja voda različite kakvoće. U domaćoj literaturi počeci primjene umjetnih neuronskih mreža u području modeliranja procesa i ponašanja vodnih pojava u vodnom gospodarstvu vezani su za modeliranje procesa u sustavu odvodnje urbanih oborinskih voda (Deduš, 1994; Šperac, 2004).

Unatoč postojanju izvjesnih mana od kojih je najveća nemogućnost analitičkoga iskazivanja utvrđenih ovisnosti među analiziranim varijablama, umjetne će neuronske mreže zbog svojih prednosti (prije svega zbog jednostavnoga načina opisivanja i prognoze složenih nelinearnih procesa) u budućnosti nesumnjivo sve više nalaziti primjenu i u vodnome gospodarstvu.

3.9. Modeli regresijskih stabala odlučivanja (RTREE)

Regresijska stabla odlučivanja su jedna od najčešće korištenih metoda strojnoga učenja, čija je velika prednost to da su ona slikovit model koji reprezentira čitav oblik odlučivanja. To je klasifikacijski algoritam stablastog oblika (slika 3.15.).

U tako oblikovanom stablu granama su povezana dva tipa čvorova – čvorovi odluke i krajnji čvorovi. U čvorovima odluke definirani su uvjeti – rubne vrijednosti određenih atributa (varijabli) te se u njima, na temelju toga, provodi testiranje. Iz tih čvorova izlaze grane koje zadovoljavaju tako određene vrijednosti atributa. U krajnjim čvorovima završavaju određene grane stabala kojima je definirana klasa kojoj pripadaju primjeri koji zadovoljavaju uvjete na toj grani stabla (http://dms.irb.hr/tutorial/hr_tut_dtrees.php). Kombinirajući regresijska stabla odlučivanja s regresijskim jednadžbama dobiva se regresijski model stablo (engl. *model tree*) u kojemu su u krajnjim čvorovima umjesto prekinutih vrijednosti pojedinih atributa dane funkcije - linearne regresijske jednadžbe s kojima je moguće provoditi prognozu vrijednosti pojedinih varijabli.

Slika 3.15.

Slika 3.15. Primjer modela regresijskoga stabla odlučivanja (IRB, 2012)

Standardna metoda izrade modela korištenjem stabla odlučivanja je rekurzivno particioniranje kod kojega izrada modela kreće od korijena stabla. U programskome paketu *WEKA* 3.7.10. postoji mogućnost izbora nekoliko algoritama za inteligentno pretraživanje podataka od kojih se najčešće, pa i u ovom radu, koristi *M5P* algoritam nastao od *M5* algoritma (Quinlan, 1992). Prema IRB-u (2012) izgradnja stabla ide

tako da se odabire atribut koji je najupotrebljiviji da se zadovolji osnovni cilj – klasifikacija primjera.

Vrlo pogodna kvalitativna mjera vrijednosti atributa u tom je smislu statistička vrijednost nazvana informacijski dobitak (engl. *information gain*) (Morgan i Messenger, 1973; Quinlan, 1986). Ta se mjera koristi da bi se odabrao najpogodniji atribut u svakome novom daljnjem koraku oblikovanja stabla odlučivanja. Za precizno definiranje informacijskoga dobitka, nužno je definirati prikladnu mjeru, pri čemu se često koristi entropija koja karakterizira čistoću nekoga skupa primjera. Proces odabira novoga atributa i razdvajanja primjera ponavlja se za svaki čvor odlučivanja, a koriste se samo oni primjeri koji pripadaju tome čvoru. Pritom su svi atributi korišteni prije toga čvora, a u istoj grani stabla isključeni iz daljnjega odabira, što znači da se mogu pojaviti samo jednom na određenoj grani stabla. Ovaj se proces nastavlja sve dok na određenom čvoru nije zadovoljen jedan od slijedeća dva kriterija:

1. svi atributi su već bili korišteni u toj grani stabla, ili
2. svi primjeri koji pripadaju tom čvoru imaju istu klasu - prema tome radi se o krajnjem čvoru grane (entropija primjera jednaka je nuli).

Da bi se stabla odlučivanja mogla koristiti kao metoda strojnoga učenja, potrebno je zadovoljiti sljedeće uvjete: podaci o primjeru opisuju se konačnim brojem atributa, klase pripadnosti definiraju se unaprijed, postoji konačan broj klasa pripadnosti i takvih klasa mora biti manje nego primjera, određeni primjer pripada samo jednoj klasi te je potrebno imati dovoljno velik broj primjera (http://dms.irb.hr/tutorial/hr_tut_dtrees.php).

Model koji se formira kao rezultat učenja na nizu povijesnih podataka nužno je testirati na povijesnim podacima koji nisu korišteni u samome procesu učenja. No, ako se pri definiranju modela on suviše dobro prilagodi povijesnim podacima, postoji

mogućnost gubitka svojstva generalizacije. Pretjerano dobro aproksimiranje odnosa u podacima pri formiranju modela (engl. *Over – Fitting*), problem je kod primjene metode stabla odlučivanja. Jedno od rješenja je i podrezivanje stabla (engl. *Pruning*) koje ograničava previše složen oblik stabla. Prvo se definira model koji će se savršeno prilagoditi podacima, da bi se potom određene grane podrezale i spriječila suviše dobra klasifikacija primjera.

Modeliranje metodom stabla odlučivanja ima svoje prednosti i mane. Najvažnija je prednost sposobnost generiranja razumljivih modela gdje se jasno odražavaju važnosti pojedinih atributa za konkretni klasifikacijski ili predikcijski problem. Ta je metoda ipak sklona pogreškama u problemima s većim brojem klasa, a s relativno malim nizom podataka za učenje/treniranje. Jedan od nedostataka metode stabla odlučivanja je njezina nestabilnost, tj. mala promjena ulaznih podataka pomoću kojih se trenira model, može rezultirati velikim promjenama topologije stabla. Istovremeno, svojstva stabla će najvjerojatnije ostati približno ista. Nestabilnost se javlja zbog velikoga broja mogućih podjela koje često imaju približno jednaku važnost (engl. *competitor splits*). Zbog toga mala promjena podataka može dovesti do sasvim druge podjele, koja dalje unosi promjene u sve grane ispod sebe (<http://www.skladistenje.com/stabla-odlucivanja>).

4. REZULTATI

Rezultati izvornih obrada ovoga doktorskog rada sadržani su i raspravljani u okviru dvaju poglavlja. U poglavlju 2. Polazišta dan je konceptualni model hidrološkoga sustava Vranskoga jezera (potpoglavljje 2.6.) temeljen na analizi geološke građe i hidrogeoloških osobitosti Vranskoga jezera (potpoglavljje 2.4.) te analiziranim značajkama samoga jezerskog prostora i zahvata u njemu. U poglavlju 5. Rasprava, rezultati provedenih obrada dani su i raspravljani u nekoliko tematskih područja. U okviru potpoglavljja 5.1.-5.3. sadržani su ponajviše rezultati obrada povijesnih vremenskih serija podataka o klimatološkim i hidrološkim značajkama Vranskoga jezera i njegova sliva, u potpoglavljju 5.4. prikazani i analizirani i podaci o kakvoći vode Vranskoga jezera u smislu periodičnih pojava njegova prekomjernoga zaslanjivanja, a u poglavlju 5.5. rezultati provedenih obrada s Vranskog jezera uspoređeni su s rezultatima obrada koje su provedene za druga dva značajnija priobalna jezera u krškom dijelu Hrvatske: Vranskog jezera na otoku Cresu i Baćinskih jezera kod Ploča. Poglavlje 5.6. sadrži rezultate provedenih modeliranja kolebanja razine vode u jezeru i njezine slanosti.

S obzirom na množinu i različit karakter rezultata obrada u ovome doktorskome radu, ocijenjeno je da je primjerenije ne izdvajati rezultate od rasprave vezane uz njih, te stoga poglavlje 5. uključuje i same rezultate. Tako integralno dani rezultati i rasprava omogućuju cjelovitije sagledavanje istraživanoga problema i uz to vezanih rezultata.

5. RASPRAVA

5.1. Analiza klimatoloških značajki

Klimatološke značajke sliva Vranskoga jezera razmatrane su na razini osnovnih klimatoloških značajki zabilježenih vremenskih serija - mjesečnih i godišnjih podataka o temperaturama zraka i količinama palih oborina. Zbog utjecaja koje klimatološke prilike imaju na vodni režim Vranskoga jezera pri uobičajenim unutargodišnjim raspodjelama vodnoga i sušnog razdoblja, u analizama su korištene hidrološke, a ne kalendarske godine. Na slici 5.1.a) prikazan je hod srednjih godišnjih temperatura zraka na dvije, po duljini motrenja i kakvoći prikupljenih podataka, referentne klimatološke postaje sa širega utjecajnog područja – Biograd n/m i Zadar. Vidljivo je da je tijekom pedeset i jedne godine zabilježen praktički istovjetan trend porasta sr. god. temperature zraka od $2,9\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ god.}$ Na slici 5.1.b) prikazan je hod godišnjih količina oborina za iste postaje iz kojega je vidljivo prisustvo obrnutoga trenda – trenda opadanja oborina. On je kod postaje Biograd n/m $5,9\text{ mm/god.}$, a kod Zadra $4,2\text{ mm/god.}$ Nešto manji trend opadanja oborina zabilježen je na postajama Poličnik ($3,2\text{ mm/god.}$) i Stankovci ($2,0\text{ mm/god.}$).

Slika 5.1.

Slika 5.1. Usporedni hod a) srednjih godišnjih temperature zraka; b) godišnjih količina oborina s klimatoloških postaja Zadar i Biograd n/m za razdoblje (1961./1962.-2011./2012.)

Što se tiče unutargodišnje raspodjele palih oborina, na primjeru Vranskom jezeru najbliže klimatološke postaje Biograd n/m (tablica 5.1., slika 5.2.), zamjetno je da po pojedinim dekadama postoje naglašenija odstupanja od prosjeka. Prije svega se to odnosi na smanjene količine oborina, posebno tijekom zimskih mjeseci dekade (1981.-1990.) te bitno manje količine oborina od prosjeka kod velikoga broja mjeseci za dekadu (2001.-2010.). Vidljivo je i da postoji vrlo velik raspon pojavnosti godišnjih količina oborina, i to između maksimalnih 1323,3 mm koliko je zabilježeno 1974. i svega 435,9 mm koliko je zabilježeno 2011. Ukoliko se, pak, gledaju hidrološke godine, minimalna godišnja količina oborina je 466,9 mm, a zabilježena je 1989./1990., dok je 2011./2012. zabilježeno 519,1 mm. U gotovo svim kalendarskim mjesecima ekstremne minimalne količine oborina su bliske ili jednake nuli, izuzev tijekom prosinca.

Tablica 5.1. Unutargodišnja raspodjela karakterističnih mjesečnih i godišnjih vrijednosti oborina s postaje Biograd n/m (1961.-2012.)

Mj.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	God.
Sred	87,7	62,5	66,0	67,6	53,7	54,6	29,2	52,5	82,4	98,3	110,7	104,9	870,1
STD	56,7	43,8	41,5	32,9	34,5	34,0	28,3	51,8	58,9	71,8	59,8	59,5	188,8
Cv	0,65	0,70	0,63	0,49	0,64	0,62	0,99	0,97	0,72	0,73	0,54	0,57	0,22
Maks	229,3	194,8	164,9	158,7	138,2	156,3	135,7	224,1	248,6	303,9	266,0	267,6	1323,3
Min	0,9	4,1	0,5	0,2	1,6	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	4,3	18,0	435,9
Dekadni prosjeci (mm)													
1961-	102,1	76,2	68,0	65,4	64,5	50,2	43,9	70,9	81,7	96,0	135,5	119,9	974,3
1971-	111,1	69,7	79,7	84,0	57,8	57,1	33,0	71,4	99,3	104,8	118,6	107,2	993,7
1981-	64,8	77,9	78,1	45,7	47,2	65,4	20,9	49,8	77,7	101,8	72,8	88,5	790,6
1991-	69,9	34,2	54,0	76,9	56,2	61,6	27,2	21,7	89,9	106,9	135,6	94,7	828,8
2001-	100,2	65,0	61,1	66,6	49,4	41,0	22,3	59,0	67,8	80,8	101,6	109,1	823,7

Slika 5.2.

Slika 5.2. Unutargodišnja raspodjela palih oborina na postaji Biograd n/m (1961.-2012.)

Ukoliko se promatra unutargodišnja raspodjela temperature zraka na istoj postaji – Biograd n/m (tablica 5.2., slika 5.3.), vidljivo je da su varijacije mjesečnih i godišnjih temperature zraka puno manje nego li je to slučaj kod oborina. Općenito se temperature zraka s vremenom povećavaju, pri čemu je posljednja dekada (2001.-2010.) bila u prosjeku čak za 0,5 °C viša od dugogodišnjeg srednjaka koji iznosi 14,7 °C. Vidljivo je i da su tijekom razdoblja od ožujka do srpanja te posljednje dekade zabilježene ekstremne srednje dekadne mjesečne vrijednosti. Najveći raspon kolebanja srednjih mjesečnih temperature zraka javlja se tijekom kolovoza (8,1 °C), a najmanji tijekom srpnja (4,8 °C).

Tablica 5.2. Unutargodišnja raspodjela karakterističnih srednjih mjesečnih i srednjih godišnjih vrijednosti temperature zraka s postaje Biograd n/m (1961.-2012.)

Mj.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	God.
Sred	6,2	6,8	9,4	13,0	17,7	21,5	24,2	23,7	19,7	15,6	11,1	7,5	14,7
STD	1,5	1,8	1,6	1,2	1,4	1,4	1,3	1,5	1,4	1,2	1,5	1,3	0,6
Cv	0,24	0,26	0,17	0,09	0,08	0,06	0,05	0,06	0,07	0,08	0,14	0,18	0,04
Maks	9,5	10,3	12,9	15,6	20,1	25,6	27,0	27,5	23,2	17,9	14,7	9,7	15,9
Min	2,2	3,1	5,3	9,8	14,6	19,2	22,2	19,4	16,9	11,2	7,8	4,2	13,5
Dekadni prosjeci (°C)													
1961-	5,2	6,6	8,8	13,1	17,1	21,1	23,4	23,0	19,8	15,9	11,9	6,7	5,2
1971-	6,6	7,7	9,2	11,9	16,7	20,6	23,2	22,5	18,8	14,5	10,3	7,4	6,6
1981-	6,1	6,3	9,3	13,1	17,7	20,8	24,3	23,6	20,1	15,8	10,3	7,7	6,1
1991-	6,8	6,8	9,5	13,0	18,2	22,3	24,7	24,9	19,9	15,9	11,2	7,8	6,8
2001-	6,5	7,0	10,1	13,7	18,6	22,5	25,3	24,3	19,6	15,8	11,6	7,6	6,5

Slika 5.3.

Slika 5.3. Unutargodišnja raspodjela srednjih mjesečnih temperature zraka na postaji Biograd n/m (1961.-2012.)

Provedene su i analize vjerojatnosti pojava maksimalnih godišnjih temperatura zraka i najmanjih godišnjih količina oborina (tablica 5.3.). Određeni su karakteri pojavnosti ekstremnih vrijednosti zabilježenih do sada. Tako je utvrđeno da je do sada maksimalna zabilježena srednja godišnja temperatura zraka na postaji Biograd n/m od 16,3 °C (2006./2007.) imala red veličine 150-godišnjeg povratnog perioda, a iste godine maksimalna srednja godišnja temperatura zraka na postaji Zadar od 16,7 °C od čak 200-godišnjega. Zabilježena minimalna godišnja količina oborina na postaji Biograd n/m bila je 60-godišnjega povratnog perioda, na postaji Zadar 100-godišnjega, a godišnja količina oborina od svega 389,7 mm, zabilježena također 1989./1990. na postaji Stankovci, bila je 150-godišnjega povratnog perioda. Dakle, očito je da su na analiziranom području već tijekom dosadašnjega razdoblja promatranja zabilježeni godišnji ekstremi s kritičnim vrijednostima.

Tablica 5.3. Vjerojatnosti pojavljivanja maksimalnih godišnjih temperature zraka i minimalnih godišnjih količina oborina (1961./1962. – 2011./2012.)

Povratni period (god)	Vjerojatnost (%)	Pojava maksimalnih godišnjih temperatura zraka (°C)		Pojava minimalnih godišnjih količina oborina (mm)		
		Zadar	Biograd n/m	Zadar	Biograd n/m	Stankovci
1.25	80	14,6	14,2	1054	1046	1115
2	50	15,2	14,7	897	875	919
5	20	15,6	15,2	734	697	723
10	10	15,8	15,5	650	607	625

20	5	16,1	15,8	583	536	549
50	2	16,4	16,0	510	460	468
100	1	16,5	16,2	464	413	418

5.2. Analiza dinamike kolebanja razine jezera i mora

Vransko jezero je izrazito složena drenažna baza površinskih i podzemnih voda sa široko rasprostranjenoga slivnog područja i aktivno se povezuje s morem kao najnižom drenažnom bazom toga područja. No, u situacijama kada su srednje dnevne razine jezera dugotrajnije niže od srednjih dnevnih razina mora, jezero se prihranjuje i morskom vodom, bilo neposredno ili njezinim transportom i miješanjem u priobalnom krškom vodonosniku. Stoga su razine Vranskoga jezera ovisne o nizu uvjeta:

- dotjecanju u jezero, koje se ostvaruje površinskim i podzemnim putem
- gubicima vode uslijed isparavanja s površine jezera
- površinskom otjecanju iz jezera, koje se odvija kanalom Prosika
- promjenama u geometriji kanala Prosike (uslijed različite obraslosti i intervencija u koritu kanala radi usporavanja otjecanja – posebno uslijed izgradnje praga, uklanjanja prepreka u kanalu te produbljivanja kanala)
- razinama podzemnih voda u vodonosniku na hrptu koji dijeli jezero od mora
- podzemnom otjecanju iz jezera prema moru
- podzemnom dotoku mora u jezero.

Pritom su razine mora iznimno važan rubni uvjet koji u vrlo značajnoj mjeri određuje dinamiku kolebanja, i to kako na unutardnevnoj, tako i na dugogodišnjoj vremenskoj skali. Utjecaj kolebanja razine mora posebno je naglašen u sušnim hidrološkim uvjetima i niskim razinama vode u jezeru. S obzirom na znatno raniji početak limnografskih opažanja (tablica 3.1.) i pouzdanije podatke, kao referentna postaja za praćenje razina vode u Vranskom jezeru odabrana je postaja Prosika-Vransko jezero. U tablici 5.4. prikazani su karakteristični podaci o mjesečnim i godišnjim razinama vode u jezeru tijekom razdoblja (1948.- 2012.).

Tablica 5.4. Karakteristične mjesečne i godišnje razine vode Vranskoga jezera na postaji Prosika (1948.-2012.)

Mj.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	God.
Srednji mjesečni i godišnji vodostaji (m n.m.)													
Sred	1,10	1,18	1,17	1,10	0,97	0,80	0,61	0,43	0,37	0,47	0,64	0,88	0,81
STD	0,47	0,45	0,42	0,38	0,33	0,28	0,24	0,19	0,17	0,27	0,36	0,42	0,24
Cv	0,42	0,38	0,36	0,35	0,34	0,36	0,39	0,44	0,47	0,58	0,57	0,48	0,30
Maks	2,07	2,14	2,10	1,97	1,77	1,47	1,17	0,85	0,73	1,59	2,12	2,08	1,32
Min	0,33	0,35	0,33	0,27	0,21	0,23	0,13	0,01	0,06	0,06	0,20	0,27	0,28
Maksimalni mjesečni i godišnji vodostaji (m n.m.)													
Sred	1,22	1,28	1,27	1,19	1,06	0,91	0,72	0,53	0,47	0,59	0,78	1,04	1,52
STD	0,49	0,47	0,43	0,39	0,35	0,31	0,27	0,22	0,20	0,33	0,41	0,47	0,44
Cv	0,40	0,37	0,34	0,33	0,33	0,34	0,37	0,41	0,42	0,56	0,52	0,45	0,29
Maks	2,24	2,23	2,17	2,08	1,93	1,62	1,34	1,05	0,84	2,09	2,24	2,23	2,24
Min	0,42	0,40	0,36	0,32	0,23	0,30	0,22	0,09	0,13	0,19	0,28	0,34	0,47
Minimalni mjesečni i godišnji vodostaji (m n.m.)													
Sred	0,94	1,06	1,04	0,98	0,85	0,69	0,49	0,34	0,30	0,35	0,50	0,71	0,26
STD	0,46	0,43	0,40	0,38	0,31	0,27	0,21	0,18	0,16	0,19	0,34	0,38	0,14
Cv	0,48	0,40	0,38	0,39	0,37	0,39	0,43	0,52	0,53	0,54	0,67	0,53	0,52
Maks	1,97	2,04	2,02	1,89	1,62	1,34	1,01	0,77	0,65	0,88	2,04	1,82	0,56
Min	0,00	0,23	0,24	0,14	0,19	0,16	-0,03	-0,16	-0,16	0,03	0,09	0,15	-0,16

Na slici 5.4. prikaz je hoda srednjih godišnjih vodostaja te maksimalnih i minimalnih godišnjih vodostaja u Vranskome jezeru zabilježenih na postaji Prosika - Vransko jezero, a koji su tijekom ljeta 2012., za vrijeme spuštanja razine Vranskoga jezera ispod kote "0" vodokazne letve, nadopunjeni s podacima s postaje Pakošanski most – Vransko jezero. Vidljivo je da se vodostaji općenito prate, kao i da pojedinih godina maksimalni vodostaji znaju poprimiti iznimno niske vrijednosti, čak niže nego li su pojedinih godina srednje godišnje vrijednosti vodostaja. Također je vidljivo da se zabilježeni maksimalni vodostaji tijekom više godina kreću u vrlo uskim granicama (između 2,19 i 2,24 m n. m.), kao i minimalni (između 0,03 i 0,06 m n. m.). Za napomenuti je da je tijekom 2012. godine, posljednje analizirane godine, minimalni vodostaj uvelike premašio spomenute ranije uobičajene vrijednosti ekstrema i dostigao razinu od čak -0,16 m n. m.

Slika 5.4.

Slika 5.4. Hod karakterističnih godišnjih vrijednosti vodostaja ("MAX"-maksimalni, "SR"-srednji i "MIN"- minimalni) u Vranskome jezeru zabilježenih na postaji Prosika (1948.-2012.) s istaknutim njihovim prosječnim vrijednostima

Pri ocjeni stanja jezerskog sustava su osim podataka o kolebanjima razine jezera, važni i podaci o kolebanjima razine mora. U tablici 5.5. prikazane su karakteristične vrijednosti osmotrenih razina mora na mareografu Prosika, a na slici 5.5. prikazan je hod srednjih godišnjih razina mora te maksimalnih i minimalnih godišnjih razina mora na toj postaji. Vidljivo je da su tijekom analiziranoga razdoblja razine mora kolebale u relativno širokim granicama između -0,32 m n. m. i 1,20 m n. m., s prosjekom od 0,29 m n. m. Pritom je zamjetan i vrlo izražen trend porasta

razina mora za sve tri karakteristične godišnje veličine – kako srednju vrijednost, tako i ekstreme. Taj je trend prilično ujednačen kod srednjih i minimalnih razina i iznosi 5,4 cm/10 god kod minimalnih te 5,8 cm/10 god kod srednjih godišnjih razina mora. Kod maksimalnih razina mora taj je trend naglašeniji i iznosi 8,4 cm/10 god. Takvi rezultati, iako dobiveni na kratkom nizu od 24 cjelovite godine (iz analize su izostavljene 1986., 1988. i 1993. zbog prekida u motrenjima), upozoravajući su i uklapaju se u rezultate analiza trendova povećanja srednjih razina mora na najbližoj mareografskoj postaji Split, za koju su postojali dulji nizovi podataka te je utvrđen trend porasta od 4,15 cm/10 god (Čupić i sur., 2011). Ukoliko bi se rezultati analize trendova s mareografske postaje Prosika produljili na razdoblje do kraja dvadeset i prvoga stoljeća, rezultirajući porasti uklapaju se u općenite IPCC-ove (2001) procjene da bi srednja razina svjetskih mora mogla porasti između 9 i 88 cm, pri čemu je središnja vrijednost tih procjena 48 cm.

Tablica 5.5. Karakteristične mjesečne i godišnje razine mora na postaji Prosika –
Jadransko more (1986.-2012.)

Mj.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	God.
Srednji mjesečni i godišnji vodostaji (m n.m.)													
Sred	0,26	0,24	0,23	0,28	0,28	0,28	0,27	0,28	0,31	0,36	0,37	0,34	0,29
STD	0,12	0,11	0,10	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,08	0,08	0,11	0,05
Cv	0,46	0,48	0,44	0,28	0,24	0,26	0,22	0,20	0,19	0,22	0,21	0,33	0,17
Maks	0,53	0,56	0,42	0,43	0,41	0,43	0,39	0,37	0,41	0,58	0,59	0,56	0,44
Min	0,05	0,04	0,05	0,10	0,09	0,08	0,11	0,12	0,19	0,21	0,20	0,15	0,22
Maksimalni mjesečni i godišnji vodostaji (m n.m.)													
Sred	0,67	0,65	0,60	0,62	0,66	0,62	0,59	0,58	0,62	0,70	0,79	0,81	0,89
STD	0,20	0,16	0,15	0,11	0,13	0,11	0,08	0,09	0,07	0,12	0,14	0,15	0,12
Cv	0,30	0,24	0,25	0,17	0,20	0,18	0,14	0,15	0,12	0,17	0,18	0,19	0,14
Maks	1,10	1,01	0,87	0,80	0,87	0,80	0,70	0,67	0,71	1,02	1,20	1,13	1,20
Min	0,34	0,40	0,28	0,29	0,18	0,19	0,30	0,34	0,48	0,44	0,48	0,45	0,68

Minimalni mjesečni i godišnji vodostaji (m n.m.)													
Sred	-0,07	-0,09	-0,07	-0,01	0,03	0,04	0,01	0,03	0,05	0,09	0,06	0,01	-0,14
STD	0,09	0,09	0,12	0,09	0,06	0,06	0,06	0,07	0,08	0,10	0,07	0,10	0,08
Cv	-1,26	-1,01	-1,67	-10,89	2,55	1,59	6,33	2,08	1,67	1,08	1,27	8,91	-0,62
Maks	0,14	0,14	0,15	0,12	0,17	0,15	0,13	0,16	0,28	0,30	0,22	0,27	0,01
Min	-0,23	-0,27	-0,32	-0,20	-0,16	-0,09	-0,10	-0,07	-0,08	-0,06	-0,08	-0,13	-0,32

Slika 5.5.

Slika 5.5. Hod karakterističnih godišnjih vrijednosti razina mora (“MAX”-maksimalne, “SR”-srednje i “MIN”- minimalne) zabilježenih na postaji Prosika – Jadransko more (1948.-2012.) s istaknutim trendovima njihova hoda

Za ocjenu utjecaja sezonskoga kolebanja razine mora na kolebanje razine vode u jezeru vrlo je slikovit prikaz na slici 5.6. gdje su za isto razdoblje osmatranja (1998.-2012.) uspoređene prosječne vrijednosti maksimalnih, srednjih i minimalnih godišnjih razina vode u jezeru i moru. Vidljivo je da tijekom prve polovine godine (razdoblje od siječnja do lipnja), kada se u prosjeku javljaju više razine vode u jezeru, postoji nadvišenje razina vode u jezeru u odnosu na more. No, tijekom ljetnoga i rano jesenskoga sušnog razdoblja (kolovoz-listopad), a u manjoj mjeri i do kraja godine, smanjene razine vode u jezeru podudaraju se s povišenim razinama mora. Uslijed toga su tijekom razdoblja od rujna do studenog prosječne maksimalne razine mora čak za nekoliko centimetara više nego prosječne maksimalne razine vode u jezeru. Kako je do kolovoza 2009. maksimalna kota dna kanala Prosika iznosila oko 0,35 m n. m. (Hrvatske vode VGO Split, 2009), očito je da je preljevnim kanalom Prosika i krškim provodnicima u priobalnom vodonosniku u nekim situacijama moguća i obrnuta veza – utok morske vode u jezero i njegov vodonosnik. Za napomenuti je da su na slici 5.6. prikazane srednje vrijednosti karakterističnih razina jezera i mora, a da su obrnuti

gradijenti toka od mora prema jezeru uslijed redovnih unutar dnevnih kolebanja razine mora pod utjecajem plime i oseke još naglašeniji.

Podizanjem betonskoga praga u koritu kanala Prosike 2009. dno je nadvišeno za oko 0,5 m, u izvjesnoj je mjeri produljeno trajanje viših razina niskih voda u jezeru, usporena je neposredna komunikacija mora i vode iz jezera, čime je dotjecanje mora prema jezeru svedeno na podzemno protjecanje i infiltraciju kroz dno i bokove kanala Prosika kroz priobalni vodonosnik.

Slika 5.6.

Slika 5.6. Unutargodišnja raspodjela prosječnih maksimalnih, srednjih i minimalnih razina vode u jezeru i moru na lokalitetu Prosika (1998.-2012.)

Učestalosti i raspon pojava godišnjih ekstrema po pojedinim mjesecima prikazan je na slici 5.7. iz koje je vidljivo da se godišnji maksimalni vodostaji najučestalije javljaju sredinom proljeća, a minimalni krajem ljeta i početkom jeseni.

Slika 5.7.

Slika 5.7. Unutargodišnja raspodjela pojava ekstremnih razina vode u Vranskom jezeru (1948.-2012.)

Analizirana je i međusobna povezanost pojava ekstremnih godišnjih razina vode u jezeru (maksimalnih s minimalnim) (slika 5.8. a)). Analiza je pokazala naznaku postojanja povezanosti, ali sa slabo izraženom čvrstinom veze (koeficijent

korelacije $r = 0,59$). To ukazuje na to da se vrlo niske razine vode u jezeru mogu javiti i nakon vodnijih prethodnih razdoblja godišnjega ciklusa kolebanja vode u jezeru. Nasuprot tome, iznimno dobra povezanost ($r = 0,95$) utvrđena je pri analizi međuodnosa maksimalnih godišnjih razina vode u jezeru i amplitude njihovih kolebanja (slika 5.8.b)). To ukazuje na to da će se veće razine vode, ukoliko se jave u jezeru u vodnom dijelu godine, u toj istoj godini u velikoj mjeri najvjerojatnije i isprazniti iz jezera.

Slika 5.8.

Slika 5.8. Međuodnos maksimalnih godišnjih razina vode i: a) minimalnih godišnjih razina; b) godišnjih amplituda kolebanja razine vode u Vranskome jezeru

Iz ovih je međuodnosa očito da Vransko jezero, iako ima veliki sliv i volumen, brzo reagira na sezonske promjene hidroloških prilika. To je očito i iz rezultata autokorelacijskih analiza (slika 5.9.). Vidljivo je (slika 5.9.a) da maksimalne i minimalne godišnje razine vode u jezeru već u prvom koraku, odnosno nakon samo jedne godine, poprimaju vrijednost autokorelacijske funkcije bliske nuli, odnosno ispod praga od 0,2 koju je Mangin (1984) preporučio kao prag statističke značajnosti autokorelacijske međuovisnosti. Pritom veći stupanj međuzavisnosti pokazuju podaci minimalnih razina vode u jezeru, odnosno prisutno je periodično ponavljanje sušnih hidroloških prilika svakih 5-6 godina.

Ako se analizira autokorelacijska funkcija srednjih dnevnih vodostaja (slika 5.9.a), očito je postojanje periodičnosti sezonske izmjene vodnih i sušnih hidroloških prilika s maksimalnim vrijednostima autokorelacijske funkcije pri koracima od 194,

odnosno 370 dana. No, međuzavisnost hidroloških prilika, izražena preko vrijednosti opadanja autokorelacijske funkcije ispod granične vrijednosti od 0,2 traje svega oko tri mjeseca (do koraka od 102 dana). Radi se, dakle, o jezerskom sustavu koji ne pokazuje tromost u promjenama hidroloških prilika s obzirom na ranija hidrološka stanja razina vode. Stoga je takav jezerski sustav vrlo osjetljiv na pojave vrlo sušnih hidroloških prilika jer se vodne zalihe iz njegova sliva i vodonosnika brzo prazne, i jezero vrlo brzo odgovara na to pojavom vrlo niskih razina vode.

Slika 5.9.

Slika 5.9. Autokorelacijske funkcije kolebanja razine vode u Vranskom jezeru: a) godišnjih vrijednosti minimalnih i maksimalnih razina vode; b) srednjih dnevnih razina vode

Analizirana je i vjerojatnost pojave karakterističnih godišnjih razina voda u jezeru (tablica 5.6.). Pritom su, zbog osiguranja nezavisnosti članova serije analiziranoga uzorka, korišteni nizovi podataka zabilježenih sezonskih ekstrema, dakle sezonski ekstremne zabilježene vrijednosti, nezavisno o kalendarskom razdoblju u kojemu su se pojavili. Tijekom analiziranoga razdoblja zabilježena je maksimalna razina vode od 2,24 m n. m. Po svojoj je pojavnosti samo oko 30-godišnjega povratnog perioda, dok je ekstremno minimalna razina od -0,16 m n. m. koliko je zabilježeno 2012. bila čak oko 400-godišnjega povratnog perioda.

Tablica 5.6. Vjerojatnosti pojavljivanja ekstremnih razina vode Vranskoga jezera na postaji Prosika na osnovi podataka iz razdoblja (1948.-2012.)

Povratni period	Godišnji maksimumi (m n. m.)	Godišnji minimumi (m n. m.)	Srednje godišnje razine (m n. m.)	
			u smjeru pojave najviših vrijednosti	u smjeru pojave najnižih vrijednosti
100	2,49	-0,09	1,32	0,18
50	2,37	-0,04	1,27	0,26
20	2,18	0,02	1,18	0,38
10	2,02	0,08	1,11	0,49
5	1,81	0,14	1,01	0,60
2	1,42	0,27	0,82	0,82
Odabrana raspodjela	Pearson 3	Log Pearson 3	Pearson 3	
SK-test	98,84%	83,56	99,18	

5.3. Analize vodne bilance

Vransko jezero je složen hidrološki sustav kod kojega nedostaje cjelovito praćenje vodne bilance, koja bi, uz praćenja površinskih dotoka i istjecanja iz jezera, uključivala i praćenja podzemnih voda, kao i veze jezera s podzemnim krškim vodonosnikom i morem. Zbog toga je procjena vodne bilance provedena na osnovi različitih pristupa – uz pomoć mjerenih hidroloških podataka kojima su obuhvaćeni kontrolirani dotoci i istjecanja u jezerski sustav i iz jezerskoga sustava, kao i procjenom pojedinih nedostajajućih elemenata vodne bilance na osnovi klimatoloških podataka te na osnovi regionalnih hidroloških značajki. Bilanciranja sadržana u ovome doktorskom radu provedena su na različitim vremenskim skalama i s različitim razinama vremenske diskretizacije, kao i s različitim tipovima ulaznih podataka – ovisnosno o raspoloživosti podataka i svrsi provedenih obrada.

5.3.1. Kontrolirani dotoci i istjecanja

Vransko jezero je hidrološki sustav koji ima dotoke površinskih i podzemnih voda koji su samo dijelom hidrološki kontrolirani. Na pet hidroloških postaja na prostoru Vranskoga polja prate se protoke - dotoci površinskim vodama ili izvorima, a na hidrološkoj postaji Prosika – Vransko jezero prate se protoke - istjecanja iz jezera. Osnovni podaci o aktivnim hidrološkim postajama prikazani su u poglavlju 3.1., a u tablici 5.7. prikazane su karakteristične vrijednosti protoka na njima tijekom skorašnjega osmatranja. Naime, zbog ratnih prilika na tom su prostoru u razdoblju (1991.-1995.), na dijelu postaja prekinuta motrenja i mjerenja, a koja su započela još krajem osamdesetih godina prošlog stoljeća, te su u razdoblju nakon 1996. ponovno nastavljena s većim brojem hidroloških postaja.

Tablica 5.7. Karakteristične vrijednosti protoka na hidrološkim postajama u slivu Vranskoga jezera

Hidrološka postaja	Vodotok	Analizirani niz podataka	Godišnji protok (m^3s^{-1})		
			Maksimalni	Srednji	Minimalni
Prosika	Vransko jezero	1996.-2012.	9,25	0,998	0
Jankolovica	Glavni kanal	1997.-2005.	10,8	0,579	0,005
Vrana	Lateralni kanal	1997.-2012.-bez 2006./2007.	9,64	0,753	0
Burski most	Jablanski kanal	1996.-2006.	0,560	0,115	0
Oporičev most niz.	Izvor Pečina	1996.-2008.	4,97	0,171	0
Vrana	Škorobić	1996.-2012.	4,91	0,100	0

Hidrološke postaje na slivu Vranskoga jezera raspolažu s kratkim nizovima protoka različitih duljina motrenja, a dijelom i problematičnim konsumpcijskim krivuljama. Naime, mjerenja protoka na vodotocima i kanalima na slivnome području Vranskoga jezera, zbog vrlo promjenjivog stanja obraslosti korita i mijenjanja uvjeta protjecanja, pokazuju velika rasipanja kod niskih i srednjih vodostaja i uglavnom ne obuhvaćaju velike vode.

Uvid u unutargodišnju raspodjelu dotoka dan je u tablici 5.8., gdje su sadržani prikazi srednjih, te maksimalnih i minimalnih mjesečnih i godišnjih protoka, kao i na slikama 5.10. (unutargodišnja raspodjela prosječnih srednjih mjesečnih protoka) i 5.11. (godišnji udjeli dotoka s pojedinih hidroloških postaja u ukupnim hidrološki kontroliranim dotocima).

Tablica 5.8. Unutargodišnja raspodjela karakterističnih protoka u slivu Vranskoga jezera

Mj.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	God.
Srednji mjesečni i godišnji protoci (m³s⁻¹)													
Prosika	2,01	2,50	2,29	1,76	1,29	0,730	0,283	0,077	0,033	0,072	0,213	0,703	0,998
Jankolovica	1,23	0,896	0,899	0,981	0,611	0,287	0,095	0,056	0,067	0,317	0,494	1,02	0,579
Vrana Lat.	1,60	1,39	1,09	1,09	0,951	0,613	0,207	0,083	0,109	0,342	0,564	0,994	0,753
Burski most	0,180	0,158	0,148	0,134	0,113	0,092	0,076	0,066	0,070	0,088	0,110	0,150	0,115
Oporičev	0,476	0,315	0,273	0,230	0,113	0,016	0,001	0	0,039	0,058	0,179	0,349	0,171
Vrana -	0,275	0,21	0,172	0,146	0,086	0,026	0,008	0,001	0,022	0,022	0,072	0,159	0,100
Maksimalni mjesečni i godišnji protoci (m³s⁻¹)													
Prosika	6,66	8,87	9,25	5,44	4,38	2,66	1,42	0,424	0,253	0,642	2,13	4,39	9,25
Jankolovica	7,27	4,58	4,22	5,54	3,92	1,04	0,37	0,195	0,390	10,8	2,97	5,15	10,8
Vrana Lat.	9,00	9,64	5,54	6,81	4,13	2,94	1,01	0,793	2,32	3,34	5,23	7,28	9,64
Burski most	0,369	0,317	0,273	0,294	0,403	0,184	0,163	0,111	0,206	0,560	0,317	0,337	0,560
Oporičev	4,54	4,97	2,82	3,93	3,19	1,14	0,031	0	4,91	3,99	4,73	4,05	4,97
Vrana -	4,52	4,91	1,45	3,02	1,34	0,659	0,145	0,050	2,69	0,875	2,03	1,83	4,91
Minimalni mjesečni i godišnji protoci (m³s⁻¹)													
Prosika	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Jankolovica	0,062	0,056	0,062	0,068	0,056	0,015	0,012	0,012	0,005	0,010	0,018	0,062	0,005
Vrana Lat.	0,04	0,003	0,017	0,004	0,02	0,003	0	0	0	0	0,002	0,028	0
Burski most	0,041	0,053	0,053	0,053	0,041	0,041	0,028	0,009	0	0	0,041	0,035	0
Oporičev	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Vrana -	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Slika 5.10.

Slika 5.10. Hod srednjih mjesečnih protoka tijekom godine na hidrološkim postajama na slivnom području Vranskoga jezera

Slika 5.11.

Slika 5.11. Ukupno izmjereno srednje godišnje dotjecanje u Vransko jezero i srednje godišnje istjecanje kroz kanal Prosika

Iz prikaza na slikama 5.10. i 5.11. vidljivo je da se najveći dotoci u Vransko jezero s Vranskoga polja u prosjeku javljaju u hladnom dijelu godine kada na slivnom području ima najviše oborina. Najviši su u siječnju, a najniži u kolovozu. Iako su dotoci vode u Vransko jezero tijekom godine stalni, izdašniji priliv počinje uglavnom već početkom listopada pojavom intenzivnijih jesenskih oborina. Tada se javljaju veliki vodni valovi koji po vremenu trajanja i intenzitetu velikih voda u pojedinim godinama daju više od polovine ukupnoga godišnjeg dotoka Vranskog jezera. Kasnojesenski mjeseci su ujedno i razdoblja akumuliranja dotoka u samome jezeru. Najmanji dotoci u jezero događaju se tijekom proljetno-ljetnoga razdoblja kada površinski tokovi presuše ili gotovo prestanu teći, a gubici se povećavaju isparavanjem s površine jezera.

Količina istjecanja iz jezera kanalom Prosika ovisi, osim o geometriji i hidrauličkim značajkama kanala, i o razlici razina jezera i mora. U razdoblju (1996.-2012.) prosječni godišnji protok u kanalu Prosika iznosio je $0,998 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Najveći protok od $9,25 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, odnosno istjecanje vode iz jezera kanalom Prosika, zabilježen je u ožujku 2010., a gotovo tijekom polovice analiziranog razdoblja zabilježene su pojave potpunoga prestanka takvoga površinskog istjecanja koje znade trajati i po više mjeseci uzastopno.

Prosječni godišnji dotok izmjeren u razdoblju (1996.-2012.) na hidrološkim postajama putem kojih se kontrolira površinski dotok u Vransko jezero, iznosio je oko $1,50 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, varirajući pritom od najmanjega prosječnog dotoka od $0,200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, koji se javlja u kolovozu i najvećega od oko $3,30 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ koji se javlja u siječnju.

No, tijekom kratkotrajnih razdoblja pojava velikih voda (u ovome doktorskom radu analizirana su trajanja od jedan do sedam dana), u Vransko jezero dotječu vrlo značajni vodni valovi, kako po volumenu, tako i po vršnim protocima. Pojave velikih

vodnih valova u Vranskom jezeru ne mogu se neposredno pratiti na nekoj od hidroloških postaja zato što se zbog veličine jezerskog prostora odvija transformacija velikih vodnih valova, čime se njihova izlazna vrijednost protoke (u kanalu Prosika) u odnosu na dolaznu vrijednost protoka bitno smanji, transformirajući veći dio bilance vodnoga vala na prirast razine vode u jezeru. Stoga se oni određuju na osnovi dinamike prirasta volumena vode u jezeru i istjecanja iz kanala Prosika, zanemarivajući pritom (zbog vrlo maloga bilančnog udjela) gubitke vode uslijed isparavanja sa slobodne jezerske površine, kao i gubitke vode na moguće poniranje.

U tablici 5.9. prikazani su osnovni statistički pokazatelji maksimalnih zabilježenih vodnih valova prema obradama u ovome radu za razdoblje (1948.-2008.), tj. za razdoblje prije izgradnje praga na odvodnom kanalu Prosika. Uz to, u toj su tablici sadržani i rezultati probabilističkih analiza – analiza vjerojatnosti pojavljivanja maksimalnih godišnjih dotoka u Vransko jezero. Pritom su korištene funkcije vjerojatnosti tipa Gumbel, Galton, Pearson 3, Log Pearson 3, Gamma 2P i GEV (Jenkinsonova), s testiranjem dobrote prilagođavanja empiričkim raspodjelama putem testa Smirnov-Kolmogorova i χ^2 testa. Na jednak je način provedena i analiza pojavljivanja maksimalnih volumena dotoka za razdoblja duljine 1, 3, 5 i 7 dana (tablica 5.10.).

Tablica 5.9. Osnovni statistički pokazatelji zabilježenih maksimalnih godišnjih dotoka u Vransko jezero, s proračunatim vjerojatnostima njihovih pojavljivanja (1948.-2008.)

OSMOTRENO Q_{MAX} ($m^3 s^{-1}$)	
Q_{SR} ($m^3 s^{-1}$)	36,8
St.dev ($m^3 s^{-1}$)	11,5
Cv	0,30
MAX ($m^3 s^{-1}$)	72,1
MIN ($m^3 s^{-1}$)	14,6
PRORAČUNATO Q_{MAX} ($m^3 s^{-1}$)	
Q_5	47,5
Q_{10}	53,5
Q_{20}	58,9
Q_{50}	65,4
Q_{100}	69,9
Odabrana raspodjela	Gamma 2P

Tablica 5.10. Osnovni statistički pokazatelji zabilježenih pojava maksimalnih godišnjih volumena dotoka u Vransko jezero, kao i proračunatih vjerojatnosti njihovih pojavljivanja (1948.-2008.)

Parametar	1 dan	3 dana	5 dana	7 dana
OSMOTRENO V_{MAX} ($\cdot 10^6 m^3$)				
V_{SR} ($m^3 s^{-1}$)	3,3	6,0	7,6	9,1
St.dev ($m^3 s^{-1}$)	1,0	2,4	3,0	3,5
Cv	0,30	0,41	0,40	0,39
MAX ($m^3 s^{-1}$)	6,2	15,5	16,8	17,9
MIN ($m^3 s^{-1}$)	1,3	2,2	2,8	3,4
PRORAČUNATO V_{MAX} ($\cdot 10^6 m^3$)				
V_5	4,1	7,8	10,0	11,6
V_{10}	4,6	9,2	11,7	13,6
V_{20}	5,1	10,4	13,1	15,6
V_{50}	5,6	11,9	15,0	18,1
V_{100}	5,9	12,9	16,3	20,0
Odabrana raspodjela	GEV	Gamma 2P	Pearson 3	Gumbel

Iz danih je rezultata vidljivo da su tijekom analiziranoga razdoblja zabilježene i vrlo velike maksimalne vrijednosti protoka i volumena vodnih valova iznimno rijetkih pojavnosti. Radi se o pojavi vodnoga vala iz 1966., čiji su maksimalni protok, kao i jednodnevni i trodnevni volumeni, imali vjerojatnost pojavljivanja reda veličine 200-godišnjega povratnog perioda ili rjeđe, a petodnevni i sedmodnevni volumeni tek malo učestalijeg, posljednji reda veličine nešto iznad 50-godišnjega povratnog perioda.

5.3.2. Općenita ocjena vodne bilance

Kako na temelju raspoloživih, kratkih i hidrološki nedovoljno pouzdanih podataka o protokama nije bilo moguće provesti utemeljenu bilancu dotoka, takva je procjena za referentno 30-godišnje razdoblje (1961.-1990.) provedena na temelju raspoloživih klimatoloških parametara, karata prostorne raspodjele srednjih godišnjih oborina i temperature zraka (DHMZ, 2002; Čapka i sur., 2011). Pritom je korištena metodologija opisana u poglavlju 3.6. i razvijena u radu Horvat i Rubinić (2006). Zasnovana je na principima korištenja Langbeinove (1962) metode definiranja efektivnih oborina u GIS okruženju.

Također su korištene najnovije definirane granice sliva (HGI, 2012) s površinom sliva od 484,5 km² čemu treba pribrojiti i srednju površinu jezera od 31,12 km². Za napomenuti je da su u nekim ranijim obradama (Građevinski fakultet Rijeka, 2009; Rubinić i sur., 2010b) korištene granice sliva dane u dokumentu Geotehničkoga fakulteta u Varaždinu (2009) sa značajnije manjom površinom sliva od 411 km², no u ovom su doktorskom radu uzeta u obzir najnovija hidrogeološka saznanja. U tablici 5.11. prikazani su osnovni elementi prostorne raspodjele utjecajnih elemenata

provedenoga bilančnog proračuna, a na slici 5.12. nalazi se rezultirajuća prostorna raspodjela specifičnih protoka pri čemu je prostorni raster 1 x 1 km².

Tablica 5.11. Osnovni elementi provedenoga općenitog bilančnog proračuna dotoka u jezero (1961.-1990.)

Element	SR	St. dev.	c _v	MAX	MIN	RASPON
Sliv Vranskoga jezera (4,854 km²)						
God. količine oborina (mm)	961,7	80,0	0,08	1254,0	828,0	426,0
Sr. god. temperatura zraka (°C)	13,6	0,59	0,04	15,0	12,0	3,0
Specifični protok (l/s/km ²)	12,78	2,43	0,34	16,09	3,31	12,78
Površina jezera (31,12 km²)						
God. količine oborina (mm)	837,9	9,6	0,01	871,0	825,0	46,0
Sr. god. temperatura zraka (°C)	14,5	0,5	0,03	15,0	14,0	1,0

Na temelju ovih elemenata je, po spomenutoj metodologiji, proračunata bilanca ukupnih srednjih godišnjih dotoka u jezero koja iznosi 4,30 m³s⁻¹. Od toga je bilančni doprinos sliva 3,47 m³s⁻¹, a bilančni doprinos palih oborina na površinu jezera 0,83 m³s⁻¹. Provedena je i procjena prosječne bilance dotoka sliva Jadranskoga mora, koji odjeljuje pretežiti sliv Vranskoga jezera od mora (41,2 km²) i čiji je rezultat srednji godišnji protok od svega 0,19 m³s⁻¹.

Slika 5.12.

Slika 5.12. Prostorna raspodjela specifičnih protoka u slivu Vranskoga jezera (1961.-1990.)

Rezultati provedenoga modeliranja prosječne višegodišnje vrijednosti bilančnoga dotoka u jezero povezani su s ostalim bilančnim elementima. Elementi koji su bili poznati za provedbu bilanciranja bili su mjereni dotoci na hidrološkim postajama u Vranskom jezeru, mjerena istjecanja na kanalu Prosika i promjene volumena vode u jezeru na osnovi praćenja vodostaja u jezeru i utvrđene krivulje promjene površine. Pri bilanciranju su uzete u obzir i količine vode koja se crpi za potrebe vodoopskrbe i navodnjavanja, a količine voda koje se gube na isparavanje sa slobodne vodne površine jezera, procijenjene su na temelju procjene prosječnih mjesečnih vrijednosti isparavanja.

Bilanca je provedena na temelju orijentacijskih procjena izvedenih za prosječne hidrološke prilike 30-godišnjega referentnog niza (1961.-1990.) tijekom kojega se pretpostavlja da su promjene volumena vode u jezeru i njegovu krškom vodonosniku, unutar cjelokupnog analiziranoga razdoblja, zanemarive za bilančnu procjenu. Cilj te analize je procjena pojedinih komponenata vodne bilance, posebno procjena njenog najmanje poznatoga elementa – gubitaka na poniranje iz Vranskoga jezera podzemnim putem.

- PROSJEČNI UKUPNI DOTOCI – ukupno $4.30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

Ukupne dotoke sa sliva čine dotoci kontrolirani hidrološkim postajama na Glavnom i Lateralnom kanalu (podaci koji se bilježe na postajama Jankolovica – Glavni kanal, Vrana – Lateralni kanal, Burski most – Jablanski kanal, na postajama Oporičev most nizvodano s vodama izvorišta Pećina te Vrana – izvor Škorobić), hidrološki nekontrolirani podzemni dotoci i neposredna površinska otjecanja padinskih voda u jezero te voda s područja sliva Vranskoga polja nizvodno od hidroloških postaja.

Kako su raspoloživi podaci praćenja na spomenutim hidrološkim postajama vezani uglavnom za razdoblje od posljednjih petnaestak godina, procjena njihove bilance za razdoblje (1961.-1990.) provedena je tako da su za postaje na Vranskome polju ukupni zabilježeni srednji godišnji dotoci Vranskoga jezera (s prethodnom dopunom nedostajajućih podataka s postaje Jankolovica iz razdoblja (2006.-2012.) preko regresijske veze s ukupnim protokama s ostalih postaja na Vranskom polju) uspoređeni s protokama na susjednom slivu Krke na postaji Skradinski Buk te utvrđena njihova regresijska veza (slika 5.13.). Tako procijenjeni prosječni protok za analizirano 30-godišnje razdoblje s kontroliranoga dijela sliva Vranskoga jezera iznosi $1,94 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, odnosno oko $2,10 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ako se uzme u obzir i na hidrološkim postajama nezabilježeni bilančni doprinos dijela sliva Vranskoga polja nizvodno od hidroloških postaja. Uzimajući u obzir i bilančni doprinos površine sliva Vranskoga jezera, proizlazi da je ukupna prosječna bilanca ostalih hidrološki nekontroliranih podzemnih i površinskih dotoka čak oko **$1,40 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$** .

Slika 5.13.

Slika 5.13. Međuodnos srednjih godišnjih protoka Krke na Skradinskom buku i ukupnih dotoka u Vransko jezero na postajama u Vranskome polju s hidrološki kontroliranoga dijela sliva

Prosječni ukupni gubitci vode iz jezera u 30-godišnjem razdoblju jednaki su prosječnim dotocima, odnosno:

*PROSJEČNI UKUPNI GUBICI VODA – ukupno oko **$4,30 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$***

Od toga:

- *Isparavanja s vodne površine jezera – **$1,50 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$***

Gubici vode iz jezera na isparavanje su, s obzirom na plitkost jezera i visoke temperature, vrlo značajni. Na osnovi analogije sa zabilježenim isparavanjima vode iz solane na Pagu u radu Beraković (1983), ocijenjeno je da oni prosječno iznose oko 1,66 m/god. Slično tome prema provedenim iskustvenim procjenama po metodi Meyera (Hrvatska vodoprivreda, 1994) prosječno je godišnje isparavanje procijenjeno 1,403 m/god. Uzevši srednju vrijednost ova dva podatka (1,532 m/god), to s obzirom na srednju površinu jezera, rezultat je bilančni doprinos od oko $1,50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

- *Korištenje za vodoopskrbu – **0,100** $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$*

Za potrebe vodoopskrbe s područja sliva Vranskoga jezera tijekom razdoblja (2000.-2007.) zabilježeno je godišnje korištenje od prosječno $0,107 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Geotehnički fakultet, 2009). S obzirom na razvoj vodoopskrbe tijekom proteklih 50-ak godina, ali i nezabilježeno korištenje voda za navodnjavanje iz izvora lokalne vodoopskrbe, na razini godišnjega korištenja prosječni ukupni bilančni doprinos takvoga korištenja voda tijekom razdoblja (1961.-1990.) mogao bi se procijeniti na oko $0,100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

- *Korištenje voda za navodnjavanje – **0,300** $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$*

Na području sliva Vranskoga jezera, u okviru sustava za navodnjavanje čija je izgradnja započela još sedamdesetih godina prošlog stoljeća, organizirano se navodnjava oko 709 ha. Tome valja probrojiti i vrlo velik broj poljoprivrednih površina gdje se navodnjavanje provodi individualno (IGH, 2012). Na temelju specifičnih normi potrošnje iz istog dokumenta ($3188 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ za prosječnu godinu te $4035 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ za vrlo sušnu godinu) i zastupljenih površina, procjenjuje se da ono na

razini srednjeg 30-godišnjega prosjeka godišnje iznosi oko 1,0 mil. m³, odnosno prosječno oko 0,300 m³s⁻¹.

- *Istjecanje kanalom Prosika - 1,50 m³s⁻¹*

Prema zabilježenim podacima o protokama u profilu Prosika za razdoblje (1996.-2012.), na profilu ulaza u kanal Prosika iz jezera je prosječno istjecalo 0,998 m³s⁻¹. S obzirom na to da se radilo o sušnom razdoblju s oko 20 % manje oborina i značajnije višim temperaturama zraka u odnosu na razdoblje (1961.-1990.), za očekivati je da je za spomenuto referentno razdoblje 30-godišnji prosjek istjecanja iz kanala iznosio značajnije više. Stoga su, na temelju regresijske analize s postajom Skradinski buk - Krka za razdoblje (1961.-1990.), provedene i analize međudnosa proračunatih nedostajajućih dotoka u Vransko jezero i proračunatih količina istjecanja iz kanala Prosika (slika 5.14.). Analizom tih međudnosa utvrđeno je da je za analizirano 30-godišnje razdoblje prosječno godišnje istjecanje kanalom Prosika iznosilo oko **1,50 m³s⁻¹**.

Slika 5.14.

Slika 5.14. Međudnos prosječnih ukupnih srednjih godišnjih dotoka u Vransko jezero s kontroliranoga dijela sliva i prosječnih istjecanja iz jezera kanalom Prosika

- *GUBICI NA PONIRANJE – 0,900 m³s⁻¹*

Gubici na poniranje iz jezera praktički su nepoznati i u smislu zatvaranja prethodnih bilančnih procjena proizlazi da bi se na razini srednjih godišnjih prosjeka oni mogli kretati oko 0,900 m³s⁻¹. Zanimljivo je ovu procjenu usporediti s količinama

vode koja se gubi na poniranje u kanalu Prosika, a što je već uključeno u bilancu voda koja istječe kanalom Prosika.

Radi usporedbe, Građevinski fakultet u Rijeci (2009) proveo je vodomjerenja gubitaka vode iz kanala Prosike 2.7.2009. Pri izmjerenoj protoci na Prosiki od $0,502 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, utvrđeno je da je do ušća kanala Prosika dotjecalo svega $0,055 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Dakle, u situaciji kod koje je razlika između razine vode u jezeru (1,10 m n. m.) i moru (0,18 m n. m.) iznosila oko 92 cm, gubici vode iz samoga kanala Prosika iznosili su oko $0,450 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Drugo vodomjerenje provedeno je 28.10.2009. pri vodostaju u jezeru od 0,62 m n. m. te razini mora od 0,30 m n. m., odnosno pri razlici spomenutih razina od svega 17 cm. Na ulazu u kanal Prosika s jezerske strane uticalo je $0,056 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, što su količine koje su u cijelosti infiltrirane u korito kanala na njegovom toku do izvedenoga betonskog praga.

Za napomenuti je da, iako su naznačene razlike razina pri kojima su tijekom 2009. provedena spomenuta dva vodomjerenja, za ocjenu međuovisnosti gubitaka vode iz jezera o razinama jezera i mora spomenute razlike nisu i jednoznačno odredive. Naime, radi se o brzim unutardnevnim kolebanjima razine mora koje su, zbog usporenih uvjeta tečenja u podzemlju, sigurno duljeg trajanja nego li su sama trajanja vodomjerenja unutar kojih nisu niti zabilježene maksimalne dnevne oscilacije razina mora tih dana. No, i ovakva gruba terenska provjera, s obzirom na duljinu i stupanj okršnosti obala Vranskoga jezera na području vapnenačkoga hrpta koji ga dijeli od mora, potvrdila je da su gubici voda na poniranje po rubu jezerskoga sustava vrlo značajni. U tome smislu ni bilančna procjena od oko $0,900 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ prosječnih godišnjih gubitaka iz cjelokupnog jezerskoga prostora nije neutemeljena. Naime, srednja razina mora tijekom razdoblja (1986.-2012., bez 1988. i 1993. kada su podaci

motrenja bili nekompletni) iznosila je 0,18 m n. m., a srednja razina jezera tijekom toga razdoblja 0,80 m n. m., odnosno oko 0,62 m više.

Iako tijekom godišnjega hidrološkog ciklusa postoje razdoblja i visokih razina jezera pri kojima, zbog formiranja slatkovodne leće u vapnenačkom grebenu koji dijeli jezero od mora gubici i nisu naglašeni, sigurno je da u uobičajenijim stanjima smanjenih dotoka i razina podzemnih voda postoji vrlo izraženo i stalno podzemno dreniranje voda iz jezera. Sasvim je sigurno da gubici vode po obodu jezera ovise, osim o međuočnosu razina vode u jezeru i razina mora i o hidrološkim prilikama, odnosno stanju razina podzemnih voda u krškom vodonosniku. No, s obzirom na procjenu prosječne bilance dotoka neposrednoga sliva Jadranskoga mora koji odjeljuje pretežiti sliv Vranskoga jezera od mora od svega $0,190 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, očito je da se na tako uskom, a usporedno s duljom osi jezera, rasprostranjenom području, u njegovom krškom vodonosniku teško može trajno osigurati stabilnu slatkovodnu leću sa stabilnim gradijentima otjecanja k jezeru i k morskoj obali. Stoga je očito postojanje gubitaka vode iz jezera, ali i obrnuti put – zaslanjivanja vode u jezeru putem niza zaslanjenih izvora (slika 2.18.) lociranih kako u južnom rubu jezera oko Prosike (Radišić, 2013), tako i na sjeverozapadu – području Vranskoga polja gdje je proces zaslanjivanja vezan za priobalne vodne pojave na području Biograda (Fritz, 1978, 1984).

Dobiveni rezultati procjene bilance ukupnih prosječnih dotoka u Vransko jezero bliski su rezultatima bilančne procjene koju je provela Švonja (2003) s dobivenih $4,20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ za isto 30-godišnje razdoblje (1961.-1990.). Srednji godišnji koeficijent otjecanja analiziranoga prostora sliva Vranskoga jezera za referentno 30-godišnje razdoblje (1961.–1990.), uz srednju godišnju količinu oborina od 961 mm, iznosi $c = 0,271$. Radi se o maloj vrijednosti, no ona se uklapa u donje granice

prethodnih regionalnih sagledavanja srednjih godišnjih koeficijenata otjecanja. Na slici 5.15. prikazane su funkcije regionalnih značajki ovisnosti srednjih godišnjih koeficijenata otjecanja o palim oborinama po više autora koji su istraživali ovaj problem. Vidljivo je da je za sliv Vranskoga jezera srednja godišnja količina oborina, pa tako i rezultirajući srednji godišnji koeficijent otjecanja, na donjoj granici istraživanih vrijednosti, ali i da se u potpunosti uklapa u regresijsku funkciju dobivenu na osnovi rezultata s testnih slivova analiziranih u radu Horvat i Rubinić (2006).

Slika 5.15.

Slika 5.15. Regionalne značajke ovisnosti srednjih godišnjih koeficijenata otjecanja o palim oborinama na krškom području Hrvatske:

(1) Gornja granica po Žugaju (1995), (2) Srednja krivulja po Žugaju (1995), (3) Donja granica po Žugaju (1995), (4) Procjena za Helenski krš (Žugaj, 1995), (5) Krivulja dobivena prema rezultatima s testnih slivova (Horvat i Rubinić, 2005) za koju je dana i regresijska funkcija ovisnosti srednjih godišnjih vrijednosti koeficijenata otjecanja (GKO) o srednjim godišnjim količinama palih oborina (H), (6) Rezultati za slivove Dinarskoga krša s područja Hrvatske po Langbeinovoj metodi (Horvat i Rubinić, 2006), (7) Pojedinačni rezultati s testnih slivova Dinarskog krša (Horvat i Rubinić, 2006), (8) Vrijednost srednjega godišnjeg koeficijenta otjecanja za analizirani sliv Vranskoga jezera

Sasvim sigurno je da je prikazana općenita bilanca samo orijentacijska te da je za njeno cjelovitije sagledavanje nužno uspostaviti cjelovitiji monitoring i detaljnije poznavanje pojedinih njenih elemenata - isparavanja sa slobodne vodene površine, korištenje voda za navodnjavanje te praćenje dinamike kolebanja podzemnih voda. No, i ovako predočena, pruža dovoljno sigurnosti da su analizirani elementi bilančnoga proračuna i njihove vrijednosti odabrani u prihvatljivim granicama.

5.3.3. Analiza mjesečne vodne bilance

Iako je već i prilikom procjene globalne bilance (poglavlje 5.3.2.) za 30-godišnje referentno razdoblje (1961.-1990.) utvrđeno da na razini općenitih sagledavanja prosječnih godišnjih vrijednosti elemenata vodne bilance nedostaju neki od bitnih kvantitativnih pokazatelja, provedena je i detaljnija mjesečna analiza vodne bilance. Ideja je bila da se u situaciji kad se ne mogu raščlaniti nepoznati podzemni dotoci i podzemni gubici promatraju zakonitosti dinamike kolebanja Vranskoga jezera u funkciji poznatijih elemenata vodne bilance. Tako je moguće sagledavanje ponašanja sumarne bilančne komponente koja u sebi sadrži nepoznato djelovanje podzemlja u smislu dotoka i gubitaka vode iz jezerskoga sustava. Naravno, ta komponenta sadrži u sebi i sustavne pogreške zbog lošega određivanja većine ostalih bilančnih parametara (isparavanja s površine jezera, pitanje pouzdanosti hidroloških podataka o protokama s mjernih postaja s obzirom na uglavnom nedovoljno dobro određene konsumpcijske krivulje).

Analiza je provedena za razdoblje od siječnja 1997. godine do srpnja 2009., tj. za homogeno razdoblje s istovrsnim hidrauličkim rubnim uvjetima istjecanja voda iz Vranskoga jezera. To je razdoblje prethodilo izgradnji betonskoga praga na kanalu Prosika tijekom kolovoza 2009. kojim je usporeno istjecanje voda iz Vranskoga jezera. Bilanca se računala tako da se traženi parametar bilance mjesečna vrijednost „ukupnih dotoka i gubitaka” odredio sukladno bilančnoj jednadžbi (3-10) ovisno o:

- ukupnim mjesečnim dotocima mjerenim na hidrološkim postajama na Vranskom polju
 - dotocima kao posljedicom palih oborina na srednju mjesečnu površinu jezera
 - isparavanjima sa srednje mjesečne površine jezera
-

- mjesečnim istjecanjima u more mjerenim na kanalu Prosika
- zahvaćenim količinama voda u slivu
- promjenom volumena vode u samom jezeru.

Rezultati proračunate prosječne bilance sumarnih podzemnih dotoka - gubitaka vode iz Vranskoga jezera, kao i mjerenih prosječnih dotoka u jezero s postaja na Vranskome polju te srednjih razina vode u jezeru i moru za promatrano razdoblje prikazani su u tablici 5.12. Njihov je vremenski hod prikazan na slici 5.16.

Tablica 5.12. Prosječne vrijednosti osnovnih ulaznih elemenata i rezultata proračuna mjesečne bilančne analize (1997.-2008.)

Parametar	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	God.
Mjereni dotoci sa sliva (m^3s^{-1})	3,44	2,32	2,45	2,47	1,81	0,95	0,40	0,21	0,27	0,73	1,33	2,46	1,57
Istjecanje kroz Prosiku (m^3s^{-1})	1,95	2,14	1,99	1,77	1,43	0,85	0,33	0,10	0,04	0,07	0,19	0,60	0,95
Sr. mjes. razina jezera (m n.m.)	1,21	1,26	1,25	1,23	1,15	0,99	0,77	0,57	0,47	0,51	0,63	0,86	0,91
Sr.mjes. razina mora (m n.m.)	0,167	0,121	0,148	0,187	0,183	0,173	0,171	0,187	0,206	0,233	0,261	0,207	0,187
Ukupni dotoci i gubici (m^3s^{-1})	3,33	3,32	3,82	4,31	4,14	3,42	3,12	2,36	1,62	1,13	1,62	2,26	2,87
Razlika dotoka/gubitaka (m^3s^{-1})	-0,11	1,0	1,37	1,84	2,33	2,47	2,72	2,15	1,35	0,4	0,29	-0,2	1,3

Slika 5.16.

Slika 5.16. Bilančno proračunati površinski dotoci te ukupni dotoci u hidrološki sustav Vranskoga jezera umanjeni za gubitke na poniranje (1.1997. - 7.2009.)

Iz ovih je prikaza vidljivo da se na temelju provedenih bilančnih proračuna tijekom godišnjega hidrološkog ciklusa javljaju dotoci vode u jezerski sustav koji se mogu pripisati hidrološkim osmatranjima nekontroliranim podzemnim dotocima, a dijelom godine dominantni su također hidrološki nekontrolirani gubici iz jezerskoga sustava. Za napomenuti je da iskazani gubici ne isključuju mogućnost istovremenoga postojanja podzemnih dotoka na nekoj drugoj lokaciji u jezeru – radi se samo o sumarnom iskazu prevladavajuće bilančne komponente toga mjeseca.

Na slici 5.16. vidljivo je da su ukupni dotoci i gubici tako oblikovani tijekom unutargodišnje izmjene vodnih i sušnih razdoblja, da tijekom početnih mjeseci vodnoga razdoblja u dotocima prevladavaju dotoci sa sliva, koji u jezero utječu površinskom hidrografskom mrežom kanala, a koji se prate na hidrološkim postajama u Vranskome polju. Tijekom recesijskih razdoblja raste udio podzemnih dotoka u ukupnim dotocima u jezerski sustav. Podzemni dotoci se ne prate na hidrološkim postajama jer se prihranjivanje jezera odvija nelokaliziranim podzemnim putevima. Pri najvišim sezonskim razinama vode u jezeru najveće dotoke u jezero prate i najveći gubitci voda na poniranje, zbog čega bilančna komponenta „ukupni dotoci i gubici” iskazuje manje razlike u odnosu na komponentu „mjerenih dotoka sa sliva”. Snižanjem razina vode u jezeru smanjuje se razlika između srednjih razina jezera i mora, pa tako i gubici. Pri niskim razinama vode u jezeru prisutno je i prihranjivanje jezera zaslanjenim morskim vodama kroz priobalni krški vodonosnik. Ukoliko se radi o dugotrajnom sušnom razdoblju kao što je to bio slučaj 2008., smanje se kontrolirani dotoci sa sliva, ali i nekontrolirani podzemni dotoci pa tijekom tih kritičnih mjeseci prevladavaju gubici iz jezerskoga sustava.

Spomenuta zapažanja vidljiva su i na prikazu unutargodišnjih raspodjela proračunatih ukupnih dotoka – gubitaka iz sustava (slika 5.17.). Vidljivo je da, ovisno

o stanju hidroloških prilika, tijekom pojedinih godina sumarni dotoci (ili gubici) mogu poprimiti vrlo širok raspon rezultata, no i da postoji određena njihova unutargodišnja sezonalnost. U prosjeku se najveći ukupni dotoci (umanjeni za gubitke) javljaju tijekom proljetnoga razdoblja (ožujak-svibanj), a najmanji krajem ljeta / početkom jeseni (rujan-studeni).

Slika 5.17.

Slika 5.17. Prikaz proračunatih mjesečnih vrijednosti ukupnih dotoka i gubitaka iz Vranskoga jezera po pojedinim godinama (1997.-2008.)

Za napomenuti je da je dani bilančni prikaz samo približno određivanje međuodnosa mogućih nekontroliranih dotoka i gubitaka krškog sustava Vranskoga jezera. No, i sa svim ograničenjima, vezanim uz nedostatne ili pak nedovoljno precizne podloge, taj prikaz omogućava konceptualno sagledavanje međuodnosa voda u jezeru, podzemlju i moru. To je posebno važno zbog traženja rješenja zaštite jezerskoga sustava od prekomjernog zaslanjivanja do kojega dolazi upravo prihranjivanjem jezera zaslanjenom morskom vodom u razdobljima malih dotoka te povišenih razina mora u odnosu na razinu vode u jezeru.

5.3.4. Modeliranje i analiza bilance godišnjih dotoka sa sliva Vranskoga jezera na temelju povijesnih podataka i podataka generiranih klimatološkim modelima za razdoblje (1951.-2100.)

Pri provedbi modeliranja godišnjih dotoka sa sliva Vranskoga jezera korištene su već spomenute digitalne karte prostornoga rasporeda srednjih godišnjih oborina i temperature zraka za referentni 30-godišnji niz – klimatološku normalu (1961.-1990.) (DHMZ, 2002; Čapka i sur. 2011), kao i u sklopu ovoga doktorata (u poglavlju 5.3.2.) izrađena karta prostorne raspodjele specifičnih godišnjih protoka po Langbeinu (slika 5.1.2.). Procjena srednjih godišnjih protoka za sliv provedena je konceptualnim modelom prikazanim na slici 5.18.

Slika 5.18.

Slika 5.18. Konceptualni model generiranja srednjih godišnjih dotoka sa sliva Vranskoga jezera (1951.-2100.)

Na temelju dobivenih rezultata iz bloka za klimatološka modeliranja (Čapka i sur., 2011), prikazanih u poglavlju 3.5., unutar bloka za modeliranje srednjih godišnjih protoka sa sliva Vranskoga jezera uspostavljeni su odnosi između prostornih i točkastih ulaznih podataka srednjih godišnjih količina oborina i temperature zraka u slivu Vranskoga jezera, kao i na lokaciji odabrane klimatološke postaje Zadar. Vrijednosti srednjih godišnjih dotoka sa sliva proračunate su, sukladno metodologiji u poglavlju 3.5., na temelju prostorne raspodjele specifičnih protoka te su uspoređene s vrijednostima proračunatima na temelju točkastih podataka – srednjih godišnjih oborina i temperatura za isto 30-godišnje razdoblje s klimatološke postaje Zadar.

Time je uspostavljen referentni međuodnos između vrijednosti srednjih godišnjih protoka sa sliva, definiranih na prostornom rasporedu specifičnih godišnjih protoka i odgovarajućih srednjih godišnjih protoka s raspoloživim točkastim podacima - povijesnim i generiranim podacima o godišnjim količinama oborina i srednjim godišnjim temperaturama zraka za klimatološku postaju Zadar.

Generiranje godišnjih vremenskih nizova dotoka za sliv Vranskoga jezera (slika 5.18.) provedeno je na temelju podataka o srednjim godišnjim temperaturama i oborinama te njihovog međuodnosa, koristeći razvijenu modifikaciju Langbeinove metode za procjenu efektivnih oborina u GIS okruženju (Horvat i Rubinić, 2006). Ono je provedeno kako za povijesno razdoblje (1951.-2011.), tako i za razdoblje (2012.-2100.) za koje su klimatskim modelima Aladin (Bubnova i sur., 1995) i RegCM3 (Pal i sur., 2007) generirane serije podataka o godišnjim količinama palih oborina i srednjim godišnjim temperaturama zraka. Ukupni srednji godišnji dotoci u Vransko jezero dobiveni su tako da su prethodno spomenutim proračunatim vrijednostima dotoka sa sliva pridodane proračunate vrijednosti dotoka koje su posljedica palih oborina neposredno na slivnu površinu.

Dobiveni rezultati – procjene karakterističnih vrijednosti srednjih godišnjih dotoka za odabrana 30-godišnja razdoblja prikazani su na slici 5.19. i u tablici 5.13. Vrijednost srednjega godišnjeg dotoka povijesnoga niza (1961.-1990.) od $4,44 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, određena je kao prosjek trideset nizova godišnjih dotoka generiranih na osnovi spomenutoga načina primjene Langbeinove metode (1962). Ona je i vrlo bliska (razlika svega 3,3 %) vrijednosti srednjega godišnjeg dotoka dobivenoga iz karte prostorne raspodjele oborina i temperature zraka za spomenuto 30-godišnje razdoblje od $4,30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Slika 5.19.

Slika 5.19. Prikaz povijesnih podataka (1951.-2011.) i podataka generiranih modelima (2012.-2100.) nizova dotoka u Vransko jezero s odgovarajućim trendom za cjelokupno analizirano razdoblje prema modelima: a) RegCM3 i b) Aladin

Tablica 5.13. Prikaz osnovnih statističkih značajki povijesnih podataka i generiranih podataka 30-godišnjih vremenskih nizova dotoka u Vransko jezero

	SR (m^3s^{-1})	St.Dev. (m^3s^{-1})	c_v	MIN (m^3s^{-1})	MAX (m^3s^{-1})
Niz (1961.–1990.)					
Povijesni niz	4,44	2,19	0,49	1,49	11,7
Modelirani niz RegCM3	4,44	1,79	0,41	1,22	8,81
Modelirani niz Aladin	4,56	2,61	0,57	0,94	12,6
Niz (2021.-2050.)					
Modelirani niz RegCM3	4,09	1,87	0,46	1,49	9,33
Modelirani niz Aladin	3,83	2,31	0,60	0,68	10,2
Niz (2071.-2100.)					
Modelirani niz RegCM3	3,31	1,62	0,49	1,06	7,66
Modelirani niz Aladin	2,34	1,59	0,68	0,58	8,43

U tablici 5.14. prikazana su odstupanja proračunatih vrijednosti u odnosu na referentne vrijednosti određene za razdoblje (1961.-1990.). Vidljivo je da su za referentno razdoblje (1961.-1990.) rezultati dobiveni koristeći se rezultatima klimatskih modela po svojoj srednjoj vrijednosti identični (RegCM3) ili vrlo bliski (Aladin – odstupanje 2,7 %) rezultatima povijesne serije dotoka. Pritom podaci generirani modelom Aladin imaju veću varijabilnost (pa i ekstreme) u odnosu na povijesnu seriju, dok je kod rezultata dobivenih modelom RegCM3 varijabilnost manja. Za razdoblje (2021.-2050.) oba modela predviđaju smanjenje srednje vrijednosti godišnjih protoka pri čemu rezultati dobiveni modelom Aladin daju niže vrijednosti, kao i veću varijabilnost. Posebno se kritično sušne prilike očekuju u razdoblju (2071.-2100.), kada prosječne vrijednosti protoka dobivene modelom RegCM3 opadaju za 25,5 %, a modelom Aladin čak 47,3 %. Rezultate procjene srednjih godišnjih protoka po modelu Aladin tijekom toga 30-godišnjeg razdoblja na kraju 21. stoljeća karakterizira značajnije veća varijabilnost u odnosu na rezultate dobivene modelom RegCM3 i veći raspon – naglašeniji ekstremi. Vidljivo je da kod obje serije generiranih podataka srednjih godišnjih protoka postoji trend opadanja koji je naglašeniji kod obrada provedenih prema rezultatima modela Aladin.

Tablica 5.14. Prikaz odstupanja (u %) osnovnih statističkih značajki generiranih podataka 30-godišnjih nizova dotoka u Vransko jezero u odnosu na povijesni niz (1961.–1990.)

	SR (%)	St.Dev. (%)	Cv (%)	MIN (%)	MAX (%)
Niz (1961.–1990.)					
Modelirani niz	0	-18,3	-16,3	-18,1	-24,7
Modelirani niz	2,7	19,2	16,3	-37,0	7,7
Niz (2021.–2050.)					
Modelirani niz	-7,9	-14,6	-6,1	0,0	-20,3
Modelirani niz	-13,7	5,5	22,4	-54,4	-12,8
Niz (2071.–2100.)					
Modelirani niz	-25,5	-26,0	0,0	-28,9	-34,5
Modelirani niz	-47,3	-27,4	38,8	-61,0	-27,9

Ocjena homogenosti rezultata povijesnih nizova podataka i nizova podataka dobivenih koristeći spomenute klimatske modele provedena je, prema metodologiji iznesenoj u poglavlju 3.4., Wilcoxonovim (1945) neparametarskim testom (testom rangiranja), pri čemu je uvažavana razina povjerenja $\alpha = \pm 0,05$, odnosno standardna jedinična devijacija $U_0 \leq |1,98|$. Testiranje je provedeno uspoređujući povijesne nizove podataka iz razdoblja (1951.-2011.) te nizove podataka o dotocima dobivene modeliranjima klimatskih promjena prema modelima RegCM3 i Aladin (2012.-2100.) tako su ispitivani kako originalni nizovi podataka, tako i modificirani nizovi tako da je iz članova niza izuzet utjecaj/veličina iskazanog trenda za razdoblje (1951.-2100.).

Rezultati provedenih ispitivanja homogenosti prikazani su u tablici 5.15. Iz nje je vidljivo da su na temelju modeliranja modelom RegCM3 nastavljeni nizovi podataka homogeni povijesnom nizu podataka i za originalni niz i za niz iz kojega je

izuzet trend. Kod primjene modela Aladin homogenost je utvrđena jedino u slučaju izuzimanja trenda, dok su originalni nizovi podataka pokazali nehomogenost. Razlog tome je naglašenije prisutan trend opadanja vrijednosti srednjih godišnjih dotoka. S obzirom na prisutnu homogenost u slučaju izuzimanja utjecaja toga trenda, može se prihvatiti provedeni postupak modeliranja i generiranja vrijednosti godišnjih dotoka u sliv Vranskoga jezera do 2100. godine.

Tablica 5.15. Ispitivanje homogenosti modelima generiranih nizova podataka (2012.-2100.) s podacima povijesnog niza (1951.-2011.)

	Originalni nizovi podataka	Nizovi podataka s izuzetim trendom
Povijesni niz nastavljen nizom formiranim modelom RegCM3		
Standardna jedinična devijacija U_0	0,88	-1,15
Ocjena homogenosti	Homogeni	Homogeni
Povijesni niz nastavljen nizom formiranim modelom Aladin		
Standardna jedinična devijacija U_0	2,98	-1,15
Ocjena homogenosti	Nehomogeni	Homogeni

Zbirni rezultati analiza hoda vremenskih serija podataka o srednjim godišnjim dotocima u sliv Vranskoga jezera (slika 5.19.) prikazani su u tablici 5.16., gdje je dana usporedba nagiba trendova za karakteristične hidrološke pokazatelje – godišnje količine oborina, srednje godišnje temperature i srednje godišnje protoke. Ta je usporedba dana za karakteristična razdoblja ulaznih podataka – povijesnu seriju (1951.-2011.), na osnovi modeliranja modelima RegCM3 i Aladin generirane serije (2012.-2100.), te za cjelovite serije dobivene njihovom kombinacijom (1951.-2100.). Iz rezultata je vidljiv za povijesnu seriju oborina vrlo izražen trend smanjenja

godišnjih količina oborina i porasta srednjih godišnjih temperatura zraka što je uvjetovalo iznimno naglašen trend smanjenja srednjih godišnjih protoka ($-3,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} / 100 \text{ god}$, odnosno $-0,77 \text{ \%/god}$).

Tablica 5.16. Trendovi nagiba povijesnih i generiranih serija karakterističnih pokazatelja

	Godišnje oborine		Srednje godišnje temperature zraka		Srednje godišnje protoke	
	(mm/100 god)	(%)	(°C/100 god)	(%)	($\text{m}^3 \text{ s}^{-1} / 100 \text{ god}$)	(%)
(1951.-2011.)						
Povijesna	-235,6	0,26	+2,13	+0,14	-3,2	-0,77
(2012.-2100.)						
RegCM3	-2,50	-0,003	+4,13	+0,25	-1,20	-0,31
Aladin	-181,6	-0,20	+3,43	+0,20	-2,13	-0,57
(1951.-2100.)						
RegCM3	+18,7	+0,02	+2,76	+0,17	-0,88	-0,22
Aladin	-97,9	-0,11	+2,81	+0,17	-1,61	-0,44

Razdoblje tijekom kojega su generirane sintetičke vremenske serije podataka o oborinama, temperaturama i protokama (2012.-2100.) karakterizirano je povećanjem trenda porasta srednjih godišnjih temperatura zraka te ublaženjem trenda opadanja godišnjih količina oborina kod oba modela. Generirane vrijednosti srednjih godišnjih protoka za to razdoblje također pokazuju nastavak trenda opadanja izraženijeg kod modela Aladin.

Ukoliko se promatraju cjelovite vremenske serije i njihovi trendovi (1951.-2100.), također je vidljivo da postoji izražen trend opadanja srednjih godišnjih protoka, s time da je on dvostruko izraženiji kod rezultata vezanih uz klimatološka

modeliranja modelom Aladin (0,44 %/god) nego li modelom RegCM3 (0,22 %/god). To se događa zato što tijekom takvog dugoročnog vremenskog razdoblja godišnje količine oborina imaju različite trendove - po modelu Aladin trend godišnjega opadanja od -0,11 %/god, a po modelu RegCM3 praktično stagniraju, odnosno čak imaju blagi porast od +0,02 %/god. Trend hoda srednjih godišnjih temperatura zraka na obje je postaje izjednačen i iznosi +0,17 %/god. Vidljivo je da je, ovisno o lokalitetu i korištenom prognostičkom modelu, dobiven vrlo širok raspon rezultata, no oni nedvojbeno ukazuju na moguće značajnije pogoršanje bilančnih međuodnosa vodnih resursa ukoliko se nastave tendencije skorašnjih klimatskih promjena/varijacija.

Validacija rezultata primijenjenoga modela provedena je usporedbom proračunatih vrijednosti srednjih godišnjih dotoka u Vransko jezero pomoću modelskih obrada i procjena ukupnih dotoka s gubicima dobivenih iz provedenih mjesečnih bilanciranja u okviru poglavlja 5.3.3. Usporedba je provedena za razdoblje (2005.-2010.) (slika 5.20) za koje su na raspolaganju bili mjereni podaci o dotocima sa sliva. Iako su ukupni dotoci određeni na temelju mjesečne bilance zapravo umanjeni zbog neiskazanih gubitaka vode iz jezerskoga sustava na poniranje kroz krško podzemlje, vidljivo je da postoji vrlo visok stupanj povezanosti između proračunatih vrijednosti protoka određenih na ova dva pristupa (koeficijent korelacije $r = 0,97$), kao i podudarnosti njihovih proračunatih vrijednosti. Razlika proračunatih prosječnih vrijednosti za spomenuto šestogodišnje razdoblje iznosi $0,720 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, a kojega su reda veličine ($0,9 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) srednji godišnji gubici iz jezera u more putem okršenoga krškog podzemlja, određeni prema danoj procjeni u točki 5.3.2.

Slika 5.20.

Slika 5.20. Međuodnos protoka proračunatih srednjih godišnjih vrijednosti ukupnih dotoka i gubitaka na osnovi mjesečne vodne bilance (Q_{VB}) i srednjih godišnjih dotoka određenih modeliranjem na temelju klimatoloških podataka (Q_M)

5.4. Analiza zaslanjenosti vode u jezeru

Kao što je već rečeno, Vransko jezero je jedan od najosjetljivijih, posebno vrijednih vodnih resursa vrlo velike bioraznolikosti (Mrakovčić i sur., 2003). Ono je polimiktično jezero (Gligora i sur., 2007) koje se prema koncentracijama ukupnog fosfora i klorofila *a* te prema sastavu i brojnosti makrozooplanktona može klasificirati u mezotrofna jezera (Peroš – Pucar, 2006). Spada u blago bočata jezera s vrlo promjenjivim sadržajem klorida, kako unutar godine, tako i na duljoj vremenskoj skali. Prema ocjenama (Tomas i sur., 2013) temeljenim na primjeni Piperovoga dijagrama za ocjenu ionskoga sastava voda, vode Vranskoga jezera su pod jakim utjecajem mora. U vrijeme malih voda radi se o NA-CL tipu voda, a u vrijeme velikih voda je uglavnom Ca-NA-CL tipa. Usporedba dinamike kolebanja razine vode u jezeru i moru s dinamikom promjene koncentracije iona kalcija, magnezija, klora te sulfatnoga iona, pokazala je (Šikić i sur., 2013) da odnos razine vode u jezeru i moru ima neposredan i snažan utjecaj na kemizam jezerske vode.

Velike varijacije - povećanja zaslanjenja - mogu imati dalekosežne posljedice za eko-sustav jezera. Naime, Vransko jezero je dominantno slatkovodno jezero te se kao i svaki drugi ekosustav sastoji od mnogo hranidbenih nizova u složenim i međusobno isprepletenim odnosima. Drastičnom promjenom nekih od osnovnih uvjeta, u ovom slučaju saliniteta vode u jezeru, mijenjaju se ti međuodnosi i ravnoteža

sustava se narušava. U slučaju nastavka započetih negativnih procesa može se očekivati da će uginuti dio organizama koji nemaju mogućnost prihvaćanja tako naglašene velike promjene ekoloških uvjeta. Naime, povećanje zasljenjenja vode u jezeru pokreće lanac niza sukcesija i ubrzanoga odumiranja dijela neprilagodljivih vrsta. Time se stvara dodatni višak organske tvari u jezeru, povećava stupanj trofije i ubrzavaju daljnje ekološke sukcesije i degradacija jezera. Tako se smanjuje bioraznolikost te ubrzava proces trofije i ubrzanoga starenja pa i odumiranja ovoga i inače, zbog plićine jezera i donosa hranjivih soli, posebno osjetljivog jezerskog sustava (Katalinić i sur., 2008).

Na Vranskome se jezeru već pokazalo, na primjeru ihtiofaune (štuka), da postoje znakovi ugibanja dijela njihove populacije (kako tijekom kraja osamdesetih, tako i u skorašnjem razdoblju) koji bi se mogli dovesti u vezu s promijenjenim uvjetima slanosti u jezerskom sustavu (Građevinski fakultet Rijeka, 2009). Isto tako, znakovite su i nagle godišnje promjene makrofita i fitoplanktona tijekom razdoblja (2008.-2010.) (Katalinić i sur., 2012) što je bilo naročito naglašeno tijekom ekstremno sušne 2012. (Gligora Udovič i sur., 2013).

Zbog toga je za osiguranje opstojnosti Vranskoga jezera, kao posebno vrijednoga priobalnog i dominantno slatkovodnoga, blago bočatog ekosustava, uz sam hidrološki režim Vranskoga jezera, potrebno aktivno pratiti i kontrolirati i režim kolebanja i promjene slanosti vode u jezerskome sustavu. Na slici 3.1. prikazana su mjesta na kojima se u okviru redovitoga programa monitoringa, prati i kakvoća voda u jezeru, među kojima su i praćenja elektroprovodljivosti i sadržaja klorida. Ti su rezultati analizani u ovom doktorskom radu.

Slika 5.21.

Slika 5.21. Međuodnos elektroprovodljivosti i sadržaja klorida po pojedinim lokacijama uzorkovanja s pripadajućim regresijskim jednadžbama i koeficijentom korelacije „k“

Radi se o postajama Kotarka ušće i Crkvine kamp na kojima su prva povremena uzorkovanja započela još 1982., neprekidna mjesečna početkom 1996., a s početkom 2010. uzorkovanja se provode svaka dva mjeseca. Treća postaja uzorkovanja je Prosika, smještena na drugome kraju jezera ispred početka odvodnoga kanala Prosika. Na toj je postaji sustavni monitoring započeo tek početkom 2000. godine, nakon što je uočeno da se intenzivna zasljanjivanja jezerskoga sustava pretežito odvijaju upravo u tom dijelu jezera. Kako su tijekom spomenutih višegodišnjih razdoblja osmatranja zasljanjenosti vode u jezeru provedena na osnovi dva parametra (elektroprovodljivosti i sadržaja klorida), ali ne uvijek i tako da su oba parametra praćena istovremeno, radi osiguranja što duljih nizova podataka o značajkama zasljanjivanja jezerskoga sustava provedena je dopuna nizova raspoloživih podataka analizom međuodnosa njihovih vrijednosti tijekom razdoblja zajedničkoga rada.

Utvrđene su dobre veze njihovih međuodnosa koje su pokazale vrlo velik stupanj korelacije (slika 5.21.), kao i da se sva tri regresijska pravca sa slike 5.21. praktički poklapaju. Nedostajajući podaci osmatranja nadopunjeni su dobivenim jednadžbama međuodnosa, a sumarni podaci – karakteristične mjesečne i godišnje vrijednosti sadržaja klorida i elektroprovodljivosti po pojedinim lokacijama za istovrsno (jednom mjesečno) razdoblje osmatranja (2000.-2009.) te zabilježenim ekstremima iz 2012., prikazani su u tablicama 5.17.-5.19.

Tablica 5.17. Unutargodišnja raspodjela elektroprovodljivosti (μScm^{-1}) na pojedinim mjestima uzorkovanja na Vranskome jezeru tijekom razdoblja (2000.-2009.) te usporedba s 2012. godinom

Mj.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	SR.GOD.
Kotarka ušće													
Sred	2971	1906	1958	2021	1788	2261	3686	4839	4578	4977	4532	3202	3222
STD	3291	1607	1631	1579	1008	1461	2534	1611	1690	3085	3990	2988	1875
Cv	1,11	0,84	0,83	0,78	0,56	0,65	0,69	0,33	0,37	0,62	0,88	0,93	0,58
Maks	9870	5610	5000	5830	3750	5320	9020	7160	7570	10300	12790	9450	6770
Min	532	911	653	973	933	886	1470	2700	2790	1051	1150	1100	1486
2012.				8700		5930	6960	8670		8080	4450		7132
Crkvine kamp													
Sred	3335	2304	2684	2693	2491	2549	2765	3426	3679	3166	3714	3863	3063
STD	2294	1739	2022	2077	2035	2079	2057	2258	2729	2723	3272	3513	2298
Cv	0,69	0,75	0,75	0,77	0,82	0,82	0,74	0,66	0,74	0,86	0,88	0,91	0,75
Maks	6860	6680	6470	6610	6930	7150	7560	8070	8650	9520	11800	12720	8252
Min	1012	1049	1010	1028	999	1046	1222	1215	1127	958	1148	1059	1232
2012.				11750		13380	11980	13050		17100	17640		14150
Prosika													
Sred	3964	3181	2896	2826	2808	2878	3225	3896	4480	4866	4930	4329	3641
STD	3990	2892	2449	2455	2356	2546	2775	2976	3730	5244	4474	4948	3108
Cv	1,01	0,91	0,85	0,87	0,84	0,88	0,86	0,76	0,83	1,08	0,91	1,14	0,85
Maks	12680	9920	7950	7710	7550	8560	9890	11110	13410	18830	15010	16890	10822
Min	1222	1387	1173	1087	1184	1155	1139	1271	1336	1284	1360	1512	1355
2012.				13870		15560	17720	24900		26200	23000		20208

Tablica 5.18. Unutargodišnja raspodjela sadržaja klorida (mgL^{-1}) na pojedinim mjestima uzorkovanja na Vranskome jezeru tijekom razdoblja (2000.-2009.) te usporedba s 2012. godinom

Mj.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	SR.
Pakoštanski most													
Sred	843	395	409	407	336	521	1252	1443	1355	1453	1311	876	881
STD	1177	526	534	439	334	457	1142	576	582	1010	1312	1120	630
Cv	1,40	1,33	1,30	1,08	0,99	0,88	0,91	0,40	0,43	0,70	1,00	1,28	0,72
Maks	3250	1650	1600	1260	969	1350	3300	2550	2250	3200	4000	3260	2018
Min	50	90	72	98	90	122	294	581	596	96	108	94	316
2012.				2978		2039	2641	2954		3014	1427		2509
Crkvine kamp													
Sred	1069	673	780	810	756	736	883	1069	1211	1031	1234	1194	955
STD	778	585	735	718	683	615	753	669	905	845	1109	1136	753
Cv	0,73	0,87	0,94	0,89	0,90	0,84	0,85	0,63	0,75	0,82	0,90	0,95	0,79
Maks	2250	2140	2420	2240	2300	2050	2451	2440	2700	3000	3800	4100	2658
Min	290	270	256	250	256	274	257	201	374	338	460	429	324

2012.				4396		4999	4396	4786		4982	5264		4804
Prosika													
Sred	1340	914	835	869	830	814	1119	1222	1534	1648	1541	1353	1150
STD	1368	973	830	860	836	798	1199	992	1389	1875	1418	1637	1066
Cv	1,02	1,06	0,99	0,99	1,01	0,98	1,07	0,81	0,91	1,14	0,92	1,21	0,93
Maks	4200	3200	2420	2660	2700	2550	4000	3460	4560	6500	4600	5500	3606
Min	372	322	240	272	264	266	246	168	320	334	400	393	315
2012.				5478		6045	5265	8135		8525	6098		6591

Tablica 5.19. Karakteristične ekstremne vrijednosti elektroprovodljivosti i sadržaja klorida na pojedinim lokacijama uzorkovanja na Vranskome jezeru (Kotarka ušće i Crkvine kamp) za razdoblje (1981.- 2012.), a Prosika za razdoblje (2000.- 2012.) s prekidima

Parametar	Elektroprovodljivost		Sadržaj klorida	
	MAX	MIN	MAX	MIN
Kotarka ušće				
Sred	5499	1470	1730	259
STD	2567	1104	904	408
Cv	0,47	0,75	0,52	1,57
Maks	12790	4450	4000	1427
Min	1175	532	130	10
Crkvine kamp				
Sred	4662	2573	1513	786
STD	3739	2669	1178	968
Cv	0,80	1,04	0,78	1,23
Maks	17640	11750	5264	4396
Min	1420	324	520	18
Prosika				
Sred	8330	3476	3329	1087
STD	7767	3625	2725	1388
Cv	0,93	1,04	0,82	1,28
Maks	26200	13870	8525	5265
Min	1574	1087	410	168

Detaljniji prikaz hoda opaženih (i na temelju njihovih uzajamnih međudnosa dopunjenih) vrijednosti elektroprovodljivosti i sadržaja saliniteta i pripadajućih trendova prikazan je na slikama 5.22. i 5.23. Iz njih je vidljivo iznimno povećanje zaslanjenosti Vranskoga jezera tijekom proteklih nekoliko godina, s naglašenim ekstremima u 1990. (tijekom koje, nažalost, nisu provedena uzorkovanja na sve tri postaje sadašnjega državnog monitoringa), 2008. i 2012. Za postaje s raspoloživim podacima od početka analiziranoga razdoblja, tj. od početka 1982., prikazani su i trendovi hoda elektroprovodljivosti i sadržaja klorida. Oni su samo približni zato što unutar pojedinih godina na raspolaganju nije bio jednak broj uzorkovanja. No, i tako formirani nizovi daju vrlo zanimljive pokazatelje – pokazuju trend povećanja zaslanjenosti vode Vranskoga jezera, odnosno sve veći stupanj prodora morske vode u jezerski sustav.

Slika 5.22.

Slika 5.22. Hod kolebanja elektroprovodljivosti na trima postajama državnoga monitoringa u Vranskome jezeru (1982.-2012.) s trendom

Slika 5.23.

Slika 5.23. Hod kolebanja sadržaja klorida na trima postajama državnog monitoringa u Vranskome jezeru (1982.-2012.) s trendom

Maksimalni sadržaj klorida od 8525 mgL^{-1} u vodi Vranskog jezera na postaji Prosika zabilježen je 10.10.2012. (pri čemu je zabilježena elektroprovodljivost od

26200 μScm^{-1}), a čemu odgovara salinitet od 19,8 ‰, što je 56 % u odnosu na prosječni salinitet Jadranskog mora. Zabilježeni ekstremi na ostale dvije postaje nešto su manji – na postaji Kotarka ušće maksimalni sadržaj klorida iznosio je 3014 mgL^{-1} (elektroprovodljivost 8080 mgL^{-1} čemu odgovara salinitet od 5,5 ‰) i zabilježen je u istom terminu uzorkovanja. Na postaji Crkvine kamp maksimalni sadržaj klorida iznosio je 5264 mgL^{-1} (elektroprovodljivost 17640 mgL^{-1} kojoj odgovara salinitet od 12,2 ‰), a zabilježen je u mjesec dana kasnijem terminu uzorkovanja, 19.11.2012. Nakon toga, zbog zimskih dotoka vode u jezero s njegova sliva, i na toj postaji slijedi opadanje udjela morske vode u jezeru.

Ranija ekstremna zaslanjivanja s maksimumima sadržaja klorida od 6500 mgL^{-1} (elektroprovodljivost 18830 μScm^{-1}) zabilježena su 1.10.2008. na Prosiki. Tek dva mjeseca, intervala uzorkovanja kasnije, 8.12.2008., zabilježeni su ekstremi i na Crkvinama (4100 mgL^{-1} , 12720 μScm^{-1}) te na ušću Kotarke (3050 mgL^{-1} , 9710 μScm^{-1}). Za napomenuti je da su iznimno velika zaslanjenja zabilježena i pojedinih ranijih godina kada je javni sustav monitoringa kakvoće vode u jezeru bio reduciran u odnosu na postojeće stanje. Tako je 3.1.1990. na ušću Kotarke zabilježena najveća vrijednost sadržaja klorida od 2414 mgL^{-1} te elektroprovodljivost 7353 μScm^{-1} (tijekom toga razdoblja nije uzorkovano na drugim dvjema postajama), a krajem te godine, 20.12.1990. na postaji Crkvine kamp zabilježen je maksimalni sadržaj klorida od 3003 mgL^{-1} te elektroprovodljivost 7353 μScm^{-1} (na ušću Kotarke toga dana zabilježene su značajno niže vrijednosti 1614 mgL^{-1} te 5189 μScm^{-1}).

Od 5.8.1988. pa do 2.10.1992. na postaji Crkvine kamp provedena su vrlo učestala (svakih 10 dana) uzorkovanja kakvoće vode Vranskoga jezera (elektroprovodljivost, ionski sastav) kako bi se ocijenila mogućnost njezina korištenja za navodnjavanje (Romić, 1995; Romić i Tomić, 1997). Najveća vrijednost

elektroprovodljivosti tijekom toga razdoblja zabilježena je 30.10.1990. od 14500 μScm^{-1} (s odgovarajućim sadržajem klorida od 4573 mgL^{-1}), a što je, izuzevši ekstremno sušnu 2012., sekundarni ekstrem, dakle čak i više nego li je zabilježeno iznimno sušne 2008. No, sigurno je da na iznos zabilježenih ekstrema uvelike utječe i učestalost uzorkovanja, tako da je znatno veća vjerojatnost da su zabilježene vrijednosti ekstrema bliske stvarnima u razdobljima kada su uzorkovanja provedena s učestalošću od jednom u deset dana nego li jednom mjesečno, ili tijekom posljednjih godina kada se je učestalost uzorkovanja prorijedila na jednom u dva mjeseca.

Vrijednosti ekstremno visokih vrijednosti sadržaja klorida i elektroprovodljivosti vode mogu se usporediti s njihovim višegodišnjim prosječnim vrijednostima, pri čemu je kao mjerodavno uzeto razdoblje (2000.-2009.) kada su na raspolaganju bili mjesečni podaci osmatranja kakvoće vode na svim trima postajama. Podaci iz posljednje tri godine (2010.-2012.) svakako su bili zanimljivi za uključenje u taj niz. Nažalost, zbog smanjene učestalosti uzorkovanja (prelazak s uzorkovanja jednom u mjesec dana na dvomjesečno uzorkovanje) i zbog nedostatka nekih podataka, ti su podaci izostavljeni iz analize unutargodišnje raspodjele kakvoće vode s time da su njihove maksimalno zabilježene vrijednosti tijekom 2012. prikazane kao zasebni podaci i sadržane su u tabličnim pregledima (tablice 5.17. i 5.18.).

Prema podacima iz tablica 5.17. i 5.18., srednja vrijednost sadržaja klorida (i elektroprovodljivosti) za razdoblje (2000.-2009.) na mjernom mjestu Prosika iznosi 1150 mgL^{-1} (3641 μScm^{-1}), na Crkvinama 955 mgL^{-1} (3063 μScm^{-1}), a na ušću Kotarke 881 mgL^{-1} (3222 μScm^{-1}). Najniže vrijednosti sadržaja klorida (elektroprovodljivosti), tijekom spomenutoga su razdoblja, zabilježene u siječnju 2003. na postaji Kotarka ušće (50 mgL^{-1} te 532 μScm^{-1}). Nešto veće vrijednosti analiziranih parametara zabilježene su u kolovozu 2006. na postaji Prosika (168 mgL^{-1}

¹ te 1271 μScm^{-1}) te Crkvine (201 mgL^{-1} te 1215 μScm^{-1}). Radi usporedbe, prema EU direktivama (Council Directive 98/83/EC) radi se o vrijednostima ispod najveće dopuštene vrijednosti za pitku vodu (250 mgL^{-1} , 2500 μScm^{-1}).

Na slici 5.24. je prikazana raspodjela srednjih mjesečnih razina vode kao i unutargodišnja raspodjela srednjih mjesečnih vrijednosti sadržaja klorida na trima spomenutim mjernim postajama u Vranskome jezeru.

Slika 5.24.

Slika 5.24. Usporedni prikaz unutargodišnje raspodjele srednjega mjesečnog sadržaja klorida u vodi Vranskoga jezera na trima lokacijama i srednje mjesečne razine vode u jezeru (2000.-2009.)

Na slici 5.24. vidljivo je da je sadržaj klorida u vodi, općenito gledajući, obrnuto proporcionalan s razinom vode u jezeru – povećava se pri nižim razinama vode u jezeru. Pritom se po svom hodu prosječni sadržaji klorida na postaji Prosika i na postaji Crkvine kamp uglavnom prate, s time da su na postaji Prosika uvijek veći. Najmanje su razlike između njih tijekom proljeća (ožujak – lipanj), što je posljedica većih dotoka voda koje se javljaju u zimskome dijelu godine (prosinac – ožujak) te miješanja i povećanoga istjecanja voda tijekom proljetnoga razdoblja. Prosječan mjesečni sadržaj klorida na postaji Kotarka ušće pokazuje znatno veći varijabilitet – tijekom vodnijih razdoblja i prosječno viših razina vode u jezeru je znatno manji od sadržaja klorida na ostale dvije mjerne postaje. No, prosječan mjesečni sadržaj klorida tijekom sušnijih razdoblja na toj postaji naglo se povećava i premašuje njegove prosječne vrijednosti na postajama Crkvine kamp i Prosika.

Prema rezultatima povremenih praćenja sadržaja klorida i elektroprovodljivosti na nekim drugim mjestima u Vranskome jezeru i kanalu Prosika tijekom 2010. i 2011. (Građevinski fakultet Rijeka, 2011), zaslanjenja pojedinih dijelova Vranskoga jezera mogu poprimiti još i veće vrijednosti nego li su ekstremi zabilježeni na postajama državnoga monitoringa. Tako je 19.9.2011., pri srednjoj dnevnoj razini vode u Vranskome jezeru od 0,20 m n. m. te srednjoj dnevnoj razini mora od 0,52 m n. m. (u vrijeme uzrokovanja razini nižoj za 2 cm), na početku kanala Prosika s jezerske strane zabilježen sadržaj klorida od 16680 mgL^{-1} ($52700 \text{ }\mu\text{Scm}^{-1}$, salinitet 33,75 ‰), koliko je približno zabilježeno i neposredno uzvodno od praga na kanalu Prosika (slika 2.24.b)) ispod kojega se kroz dno morska voda pomiješana sa slatkom, odnosno manje zaslanjenom vodom iz lokalnoga vodonosnika infiltrira u korito kanala i pri plimi dotječe u jezero (sadržaj klorida u toj je prilici bio 16080 mgL^{-1} , elektroprovodljivost $52700 \text{ }\mu\text{Scm}^{-1}$, salinitet 33,75 ‰). U sličnoj su mjeri bile zaslanjene vode izvora Jugovir smještenoga na krajnjem jugoistočnom rubu jezera (slika 2.18.a)) - sadržaj klorida 16610 mgL^{-1} , elektroprovodljivost $56700 \text{ }\mu\text{Scm}^{-1}$ te salinitet 30,02 ‰. U toj je prilici čak i priobalni dio jezera, neposredno ispred izvora Jugovir, imao iznimno visok stupanj zaslanjenja - sadržaj klorida 8540 mgL^{-1} , elektroprovodljivost $26100 \text{ }\mu\text{Scm}^{-1}$ te salinitet 15,44 ‰. Nakon dva dana, uz 3 cm nižu razinu vode u jezeru te 13 cm nižu srednju dnevnu razinu mora (28 cm nižu trenutačnu razinu u trenutku mjerenja), zabilježena su još veća zaslanjenja na ulazu u kanal Prosika s jezerske strane (sadržaj klorida 19795 mgL^{-1} , elektroprovodljivost $56100 \text{ }\mu\text{Scm}^{-1}$ te salinitet 35,76 ‰) i na izvoru Jugovir (sadržaj klorida 20910 mgL^{-1} , elektroprovodljivost $57400 \text{ }\mu\text{Scm}^{-1}$ te salinitet 37,77 ‰). Istovremeno, more uzorkovano 50-ak metara od ušća kanala Prosika u more, imalo je sljedeće značajke - sadržaj klorida 21095 mgL^{-1} , elektroprovodljivost $58600 \text{ }\mu\text{Scm}^{-1}$ te salinitet 38,11 ‰.

Još zorniji prikaz režima zaslanjenja Vranskoga jezera dan je na slici 5.25., na kojoj je za razdoblje (1996.-2012.), uz prikaz hoda kolebanja sadržaja klorida, prikazano i dnevno kolebanje dotoka kanalom Kotarka (podaci s postaje Jankolovica – Glavni kanal do 2005., a za kasnije razdoblje podaci su nadopunjeni korelacijom s podacima s postaje Burski most - Jablanski kanal) te hod kolebanja dnevnih razina vode u jezeru na postaji Prosika.

Slika 5.25.

Slika 5.25. Prikaz dinamike kolebanja mjesečnih podataka o sadržaju klorida na trima postajama u Vranskome jezeru s usporednim prikazom dinamike kolebanja dnevnih razina vode u jezeru na postaji Prosika i dnevnih dotoka kanalom Kotarka (1996.-2012.)

Vidljivo je da se, ovisno o hidrološkim prilikama, zaslanjenje jezera odvija iz dva različita dijela jezera – sa sjeverozapadnoga kraja jezera putem kanala Kotarka i jugoistočnoga iz šire zone oko kanala Prosika. Tijekom uobičajenih hidroloških prilika kakve su na primjer vladale tijekom razdoblja (2001.-2006.) na ušću kanala Kotarka, najveća se zaslanjenja javljaju u situacijama smanjenih dotoka vode. Uobičajeno je i da sadržaj klorida u vodi na tome rubnom lokalitetu Vranskoga jezera u početnim dijelovima trajanja suše premašuje sadržaj klorida u vodi otvorenoga dijela jezera na obližnjoj postaji Crkvine kamp, pa čak i sadržaj klorida na postaji Prosika. Dugim trajanjem sušnoga razdoblja snizuje se razina vode u jezeru, a što sukladno konceptualnomu hidrološkom modelu djelovanja Vranskoga jezera, opisanom u poglavlju 2.11., pogoduje prodoru mora kroz okršeni vapnenački greben u jezero i s njime povezan vodonosnik. Nastavkom dugotrajnih sušnih razdoblja povećava se unos zaslanjenih voda s tog jugoistočnoga dijela jezera, te se najprije na

mjernoj postaji Prosika, a onda postupno sve do drugog kraja jezera i postaje Crkvine, javlja povećani sadržaj klorida/elektroprovodljivost, u takvim prilikama, uobičajenim kašnjenjem od 1-3 mjeseca.

Ukoliko se radi o vrlo izraženim dugotrajnim sušnim razdobljima kakvo je bilo zabilježeno 2008. nakon također iznimno sušnog zimskog razdoblja 2007./2008. u kojima su zabilježani vrlo mali dotoci sa sliva u jezero, razine vode u jezeru se spuštaju ispod kritičnih granica koje osiguravaju ravnotežu i zaštitu od značajnijih prodora mora, te dolazi do jakoga zaslanjivanja jezera iz šire zone oko Prosike. Sadržaji klorida/elektroprovodljivost poprimaju višestruko veće vrijednosti od uobičajenih i tek značajniji dotoci slatkih voda iz područja Vranskoga polja i njegovih rubnih dijelova te podizanje razine voda u jezeru uvjetuju njegovo postupno odslanjivanje. Zbog velikoga volumena jezera u odnosu na godišnje dotoke koji rezultiraju vremenom izmjene vode od oko sedam mjeseci, proces oslađivanja jezera je spor i u opisanome slučaju iz 2008. odvijao se kroz dvije sljedeće godine. Stanje se stabiliziralo tijekom sušnog ljetnoga razdoblja 2010., sa sadržajem klorida koji je bio dvostruko veći od uobičajenih tijekom sličnih sušnih razdoblja.

Primjetno je da sadržaj klorida/elektroprovodljivost na postaji Crkvine uvijek kasni i poprima niže vrijednosti od onih koje su zabilježene na postaji Prosika, a što ukazuje na smjer i dinamiku zaslanjivanja jezerskoga sustava. No, nakon kratkotrajnoga ponovnog vršnog zaslanjivanja jezera na postaji Prosika krajem sušnoga razdoblja 2010. te vrlo malih dotoka u vodnome dijelu 2010./2011., u drugome dijelu 2011. slijedi novi i vrlo jak početak zaslanjivanja jezera s dosegnutim maksimumima u toj godini sličnim onima zabilježenim 2008. Zbog iznimno niskih dotoka u vodnome dijelu razdoblja (2011.-2012.) taj je proces, s vrlo malim smanjenjem zaslanjenosti sredinom 2012., nastavljen i tijekom drugog dijela 2012.,

krajem kojega su dosegnuti i aposlutni maksimumi pokazatelja zaslanjivanja. Vezano uz nastavak spomenutoga procesa zaslanjivanja jezerskoga sustava tijekom 2012., važno je napomenuti da, iako razdoblje nakon 2012. nije bilo predmet analiza u ovome doktorskom radu, već početkom 2013. dolazi do ponovnoga pada zapaženih maksimuma uslijed pojava izraženijih dotoka vode sa sliva u Vransko jezero te podizanja njegove razine.

Detaljniji godišnji prikazi stanja kolebanja utjecajnih hidroloških elemenata za tri karakteristične godine dani su na slikama 5.26. (za 2008.), 5.27. (za 2010.) i 5.28. (za 2012.). Spomenute slike prikazuju satne i srednje dnevne razine more u jezeru i moru s postaja Prosika - jezero i Prosika – Jadransko more, negativne razlike između srednjih dnevnih razina vode u jezeru i moru (prilike kada su srednje dnevne razine mora više od srednjih dnevnih razina vode u jezeru), srednje dnevne dotoke u jezero s postaje Jankolovica – Glavni kanal (Kotarka), podatke o sadržaju klorida na mjernim postajama Prosika, Kotarka ušće i Crkvine, kao i položaj kote dna kanala Prosika.

Slika 5.26.

Slika 5.26. Prikaz karakterističnih hidroloških elemenata i rezultata uzorkovanja sadržaja klorida u Vranskom jezeru tijekom iznimno sušne 2008. godine

Slika 5.27.

Slika 5.27. Prikaz karakterističnih hidroloških elemenata i rezultata uzorkovanja sadržaja klorida u Vranskom jezeru tijekom vodne 2010. godine

Slika 5.28.

Slika 5.28. Prikaz karakterističnih hidroloških elemenata i rezultata uzorkovanja sadržaja klorida u Vranskom jezeru tijekom ekstremno sušne 2012. godine

Iz prikaza na slikama 5.26.–5.28., vidljive su reakcije jezerskoga sustava u smislu promjene sadržaja klorida na pojedinim mjestima u jezeru s obzirom na različite hidrološke prilike tijekom pojedinih godina. Tijekom iznimno sušne 2008. godine srednja dnevna razina vode u jezeru je 113 dana bila niža od srednje dnevne razine mora, s maksimalnom negativnom razlikom od 28 cm. No, vidljivo je i da je zbog unutardnevnih oscilacija plime i oseke razine mora učestalo nadvisuju razine vode u jezeru tijekom najvećega broja dana u godini. No, pri vodnijim hidrološkim prilikama i većim razinama vode u jezeru, kratkotrajno mijenjanje gradijenta tečenja unutar krškoga vodonosnika grebena koji dijeli jezero od mora ne uzrokuje prodore mora u jezerski sustav. No, takve učestale promjene sigurno utječu na unutardnevne oscilacije brzina tečenja podzemnih voda i posljedično u duljem vremenskom razdoblju i na samu strukturu krškoga vodonosnika, tj. njegovu veću otvorenost, a time i na pospješivanje dinamike unosa zaslanjene vode u krški vodonosnik, pa i u samo jezero.

Na slici 5.26. vidljivo je da tijekom kraćega vodnijeg razdoblja u proljeće 2008. uslijed smanjenja dotoka u jezerski sustav i povećanih gubitaka vode na isparavanje s površine jezera dolazi do smanjenja razine vode u jezeru, prestanka prelijevanja vode iz jezera kanalom Prosika, te sve sporiji nastavak spuštanja razine vode u jezeru. Počinju se javljati i prilike kada su srednje dnevne razine vode u jezeru niže od srednjih dnevnih razina mora, najprije povremeno, a od početka kolovoza

2008. i kao stalna višemjesečna pojava. Tako se počinju ostvarivati i povećani dugotrajniji prodori zaslanjene morske vode u jezerski sustav. To je početkom listopada 2008. godine uvjetovalo i pojavu maksimalnih godišnjih koncentracija sadržaja klorida na Prosiki (6500 mgL^{-1}). Porastom razine vode u jezeru, uglavnom zbog smanjenja gubitaka na isparavanje u hladnijem dijelu godine te posebno povećanjem dotoka u jezero nakon početka kasnojesenskoga kišnog razdoblja, dolazi do povećanja razine vode u podzemlju, a zbog smanjenja gradijenta tečenja morske vode prema jezeru, i smanjenja unosa morske vode u jezerski sustav. Takvom dinamikom izmjena vodnih masa dijelom se odslanjuje jugoistočni dio jezerskoga prostora vezanog uz Prosiku, što je vidljivo iz pada sadržaja klorida. Time, uslijed procesa postupnog miješanja voda iz zaslanjenijih dijelova jezera (Fisher i sur., 1979), čemu pridonose i unutardnevne oscilacije jezera zbog strujanja vjetra i vlastitih oscilacija jezerskoga sustava, dolazi do postupnoga opadanja sadržaja klorida u jugoistočnome dijelu jezera, uz istovremeno povećanje njegova sadržaja u sjeverozapadnome dijelu jezera.

Tom istovremenom povećanju sadržaja klorida i u sjeverozapadnome dijelu jezera, manjim dijelom (zbog malih dotoka u to vrijeme) pridonose i slanije vode putem površinskih vodotoka i bočatih izvora na području Vranskoga polja, čije se vode dreniraju prema jezeru. Pritom je stalno prisutna veća koncentracija klorida na ušću Prosike u odnosu na otvoreno jezersko područje Crkvine, što je opet manja koncentracija nego li su koncentracije klorida na južnijim dijelovima jezera. Na slici 5.26. vidljivo je da je krajem studenoga i početkom prosinca 2008. uslijedio novi val zaslanjivanja jezera na području Prosike. On je neposredna posljedica povećanih razina mora u tome razdoblju. Uslijed toga su se pojavile ponovne negativne razlike

razina vode u jezeru u odnosu na more, a time se povećao dotok morske vode u jezerski sustav.

Tek nastupom značajnijega vodnog razdoblja tijekom prosinca 2008. s povećanim dotocima vode sa sliva koji su utjecali na podizanje razine vode u jezeru do te mjere da su se javila i prelijevanja vode iz jezera u more, dolazi do nastupanja povoljnijih hidroloških prilika u jezerskome sustavu. Uz povišenje razina vode u jezeru povećava se i razina vode u krškome vodonosniku (slika 2.27.) čime se sprječava unos zaslanjene morske vode u okršeni hrbat koji jezero dijeli od mora te dijelom čak i prihranjuje samo jezero. U jezeru to se još očituje tako da uslijed prelijevanja voda iz jezera kanalom Prosika dolazi do usmjerenoga gibanja dijela pripovršinskih jezerskih vodnih masa prema jugoistočnom dijelu jezera gdje je preljevni kanal Prosika. Tako početkom prosinca 2008. dolazi do postupnoga smanjenja sadržaja klorida na svim dijelovima jezera. S obzirom na to da se radi o visokim sadržajima klorida, potrebno je dulje vrijeme za potpuno miješanje voda i općenito smanjenje njihova sadržaja.

Primjer uobičajene vodne godine je 2010. (slika 5.27.) kada je tijekom zimsko-proljetnoga razdoblja, za vrijeme visokih razina vode u jezeru trajalo prelijevanje vode iz jezera kanalom Prosika preko betonskog praga izgrađenog u ljeto 2009. Sredinom travnja 2010. praktički je dosegnuto izjednačenje sadržaja klorida u jezeru, a ujedno je postignut i njihov minimalni sadržaj ne samo u 2010., već minimalni i unutar cjelokupnoga razdoblja (2008.-2012.) (691 mgL^{-1} na području kod Crkvine kamp te 789 mgL^{-1} na području kod Prosike, uz napomenu da za tu godinu nisu postojali rezultati uzorkovanja na postaji Kotarka ušće). S nastavljenim spuštanjem razine, voda još neko vrijeme iz jezera otječe kanalom Prosika infiltrirajući se kroz njegovo dno i bokove, a samo jezero postaje osjetljivije na unos zaslanjene

morske vode. Taj se unos odvija obrnutim gradijentima infiltracije i tečenja morske vode tijekom razdoblja plime kanalom Prosika te kroz priobalne izvore smještene u jugoistočnom dijelu jezera koji se prihranjuju iz priobalnoga vodonosnika. U tom prostorno vrlo ograničenom vodonosniku je zbog trajanja sušnoga razdoblja i unutardnevnih oscilacija mora narušena ravnoteža slane i slatke vode te u jezero dotječe sve slanija voda.

Početak rujna 2010., u uvjetima smanjenih dotoka i povećanih gubitaka na isparavanje iz jezera, javljaju se kratkotrajna stanja negativnih razlika srednjih dnevnih razina vode u jezeru u odnosu na srednje dnevne razine mora. To i periodička dnevna plimotvorna stanja uvjetuju pojačanu infiltraciju morske vode u okršeni vodonosnik i kanal Prosiku. Posljedica je ponovno postupno povećanje sadržaja klorida, ponajviše u jugoistočnome dijelu jezera (zbog smanjenja učestalosti uzorkovanja na dvomjesečni ciklus nije moguće točno odrediti vrh polutograma sadržaja klorida), a postupno i u smanjenom obujmu i na sjeverozapadnome dijelu jezera. Ponovni jesenski ciklus pojavljivanja vodnoga razdoblja, smanjenih gubitaka na isparavanje i povećanih dotoka voda sa sliva, uvjetuje ponovni početak istjecanja vode iz jezera prema moru kanalom Prosika te uz miješanje jezerskih masa vode ponovno povremeno odslanjivanje jezera.

Kritičan i do sada još nezabilježen slučaj ekstremnoga zaslanjivanja jezerskoga sustava prikazan je na slici 5.28. Sušno razdoblje, koje je započelo 2011., nastavilo se i tijekom zimsko-proljetnoga razdoblja 2012., tako da su praktički izostala ne samo prelijevanja voda iz jezera, nego i bilo kakvi značajniji dotoci vode u jezero. Tako se već početkom ožujka 2012. javljaju niske dnevne razine vode u jezeru u odnosu na razine mora (s trajanjem od svega dva dana). No, zbog, uglavnom, ipak prisutnoga pozitivnog gradijenta međuodnosa razine mora i jezera, pa i unutardnevnih

razdoblja (osim tijekom plime) istjecanja voda iz jezera infiltracijom kroz kanal Prosika, prodiranje mora i povećanje tijekom te godine i inače iznimno visokih koncentracija sadržaja klorida donekle je usporeno sve do lipnja 2012. Naime, krajem lipnja te godine započinje dugotrajno razdoblje s prilikama u kojima su srednje dnevne razine vode u jezeru niže od onih u moru. Ovakvi uvjeti traju do kraja rujna 2012., s prosjekom razlike razine vode u moru i jezeru od 23 cm, te spomenutim dnevnim maksimumom od čak 45 cm koji je zabilježen 28.8.2012. To je uvjetovalo novi dodatni povećani unos zaslanjene vode u jezerski sustav. Dosegnut je i maksimum sadržaja klorida u jezerskoj vodi na području Prosike sredinom listopada od čak 8512 mgL⁻¹. Tek značajnije oborine i dotoci koji su uslijedili te dinamiziranje jezerskih vodnih masa i njihovo usmjereno gibanje k jugoistočnome dijelu jezera uz otjecanje kanalom Prosika uvjetovali su početak smanjenja koncentracije sadržaja klorida na području Prosike i Kotarke ušće, a nakon pojačanoga miješanja zaslanjene i slatke vode i na području Crkvine.

Jezero na pojave suša odgovara tako da spušta svoju razinu i brže dolazi do ispod razine mora zbog povećane količine isparavanja s njegove površine koja premašuje dotoke voda sa sliva. Time se značajnije mijenjaju gradijenti toka podzemnih voda u okolnome krškome vodonosniku koji ga dijeli od mora. Dolazi do povećanoga unosa zaslanjene morske vode u jezerski sustav koja onda dijelom usporava daljnje spuštanje jezerske razine, ali i mijenja kakvoću jezerske vode – ubrzava proces zaslanjenja jezerskoga sustava i njegova vodonosnika.

Za ocjenu tromosti jezerskoga sustava na promjenu sadržaja klorida i elektroprovodljivosti te periodičnosti njihovih pojava, provedene su i analize njihovih autokorelacijskih funkcija (slika 5.29.). Kako su zbog velike čvrstoće povezanosti sadržaja klorida i elektroprovodljivosti dobivene praktički istovrsne autokorelacijske

funkcije, na slici 5.29. prikazane su samo autokorelacijske funkcije sadržaja klorida u jezerskoj vodi.

Slika 5.29.

Slika 5.29. Autokorelacijske funkcije mjesečnih podataka o sadržaju klorida na trima lokacijama u Vranskome jezeru (2000.-2009.)

Vidljivo je da autokorelacijske funkcije za mjerna mjesta uzorkovanja Prosiku i Crkvine kamp imaju vrlo sličan oblik, što ukazuje na to da, iako spomenute lokacije imaju značajne razlike u sadržaju klorida, imaju vrlo sličnu dinamiku promjene vrijednosti tijekom godine, odnosno zbog unutarjezerske cirkulacije voda pokazuju slična svojstva periodičnosti i tromosti promjene sadržaja klorida i elektroprovodljivosti jezerskoga sustava. Ako se kao kriterij za postojanje međuzavisnosti, odnosno donju vrijednost praga značajnosti autokorelacijske funkcije, prihvati referentna vrijednost $|0,2|$ (Mangin, 1984), onda slijedi da za Vransko jezero na mjestima Prosika i Crkvine kamp postoji dugotrajna tromost u pogledu stanja zaslanjenosti vode jezerskoga sustava - oko 16 koraka/mjeseci. To je znatno dulje u odnosu na tromost jezera u pogledu dinamike kolebanja njegove razine vode (poglavlje 5.2.) što znači da nije dovoljna samo jedna godina s povoljnim hidrološkim prilikama da se jezero u kojeg su prodrle značajnije količine morske vode odslani do stanja koje je prethodilo tom zaslanjivanju.

Nasuprot spomenutoj izraženoj tromosti promjene stanja zaslanjenosti jezerske vode u otvorenome dijelu jezera, rezultati autokorelacijske analize prikupljenih podataka s postaje Kotarka ušće, pokazuju znatno manju tromost od oko 5 mjeseci,

kao i 12-mjesečnu periodičnost. Tu je kakvoća vode u Vranskome jezeru pod neposrednim utjecajem dotoka vode sa sliva Vranskoga polja kanalom Kotarka, kao i unutar godišnje izmjene vodno-sušnih razdoblja dotoka unutar kojih se, uslijed različitih komponenti dotoka sa sliva i izvora u Vranskom polju od kojih neki i zaslanjuju, mijenja i sadržaj klorida/elektroprovodljivosti.

Prostornu analizu sadržaja klorida Vranskoga jezera i analizu međudnosa zaslanjenosti na različitim dubinama proveo je Pavletić (DHMZ, 1973). Pritom su korišteni mjesečni podaci uzorkovanja sadržaja klorida tijekom kratkotrajnoga razdoblja od srpnja 1971. do studenog 1972. godine, ali s većim brojem postaja (osam) smještenih po obodu Vranskoga jezera. Što se tiče prostornoga rasporeda mjesta uzorkovanja, u spomenutom dokumentu DHMZ-a (1973) zaključeno je da pojava većega, odnosno manjega saliniteta na pojedinim mjestima uzorkovanja nije podvrgnuta izvjesnoj zakonitosti prostorne raspodjele saliniteta u jezeru, odnosno da ne postoji statistički značajna razlika u salinitetu po pojedinim točkama, već da su fluktuacije saliniteta po pojedinim točkama sasvim slučajne pojave i karakteristika su danoga uzorka. Na svim mjestima su uzorkovanja provedena u tri različite točke po dubini i to ovisno o lokaciji i stanju razine vode, blizu površine (0,3 - 0,5 m), pri srednjoj dubini (0,6 - 2,25 m) te u blizini dna (0,8 - 4,0 m). Statistička analiza uzoraka po dubini, za svako uzorkovano mjesto, pokazala je da ne postoje statistički značajne razlike između saliniteta po pojedinim razinama, odnosno da se salinitet značajno ne mijenja s dubinom jezera. Zbog toga su ukinuta uzorkovanja kakvoće vode po dubini vodenoga stupca koja su se nekada provodilo na postaji Crkvine kamp, te se uzorci uzimaju samo s površine jezera.

Rezultati analiza u ovome poglavlju temelje se na podacima višegodišnjih nizova s triju mjesta uzorkovanja, suprotno rezultatima ocjene dane u dokumentu

DHMZ-a (1973), pokazuju očite razlike, posebno između rezultata uzorkovanja na ušću Kotarke, koje i nije bilo obuhvaćeno uzorkovanjima kakvoće vode tijekom 1971./1972., i ostale dvije postaje. Zbog tromosti jezerskoga sustava u pogledu propagacije zaslanjenih voda u Vranskome jezeru, lokacija uzorkovanja Crkvine može se smatrati pogodnom za ocjenu stanja zaslanjenosti cjelokupnoga sustava Vranskoga jezera. Podaci uzorkovanja s postaje Prosika pogodniji su pak za ocjenu stupnja rizika zaslanjivanja Vranskoga jezera jer je postaja smještena na dijelu jezera na kome je znatno veći unos zaslanjenih voda u jezerski sustav u odnosu na zaslanjivanja dotokom zaslanjenih voda izvora koji povremeno zaslanjuju u Vranskome polju. Naime, maksimalne koncentracije sadržaja klorida/elektroprovodljivosti na ušću Kotarke javljaju se isključivo u vrijeme vrlo malih dotoka voda tim kanalom.

5.5. Hidrološke značajke Vranskoga jezera u regionalnim okvirima

Koliko je Vransko jezero poseban vodni resurs, ne samo u okvirima dalmatinskoga priobalja, nego i širega priobalnog krškog regionalnog prostora, može se vidjeti iz regionalnog sagledavanja njegove hidrološke problematike. Za područje hrvatskoga krša provedena je regionalna analiza trendova opadanja protoka za referentno 30-godišnje razdoblje (1961.-1990.), koje je završilo s vrlo izraženim višegodišnjim sušnim razdobljem započetim osamdesetih godina prošloga stoljeća, posebno u drugoj polovici (slika 5.30.). Tu je, izraženo u modularnim vrijednostima, analiziran međuodnos između površine sliva i koeficijenta nagiba toga trenda, određen je njihov prosječni regresijski odnos i anvelopa maksimalnih nagiba. Ulazni podaci za tu analizu bili su rezultati mjerenja srednjih godišnjih protoka s četrdeset i

pet odabranih hidroloških postaja na krškome području Hrvatske (Švonja i sur., 2003) te su na osnovi njih definirani odgovarajući linearni trendova hoda, odnosno koeficijenti nagiba tih trendova. Na slici 5.30. prikazani su dobiveni rezultati sa dodanim rezultatom i za dotoke u Vransko jezero. Važno je napomenuti da se u slučaju Vranskoga jezera nije radilo o mjerenim dotocima, nego proračunanim vrijednostima na temelju ovdje provedenih analiza (točka 5.3.4.).

Slika 5.30.

Slika 5.30. Prikaz rezultata regionalizacije koeficijenta trenda opadanja srednjih godišnjih protoka tijekom referentnoga 30-godišnjeg razdoblja (1961.-1990.) u hrvatskom dinarskom kršu te pripadajuća prosječna krivulja i minimalna anvelopa

Iz slike 5.30. je vidljivo da se uključeni podatak o nagibu trenda opadanja srednjih godišnjih protoka Vranskoga jezera nalazi vrlo blizu donje anvelope. To ukazuje na brzo pražnjenje njegovih podzemnih rezervi te uvjetuje posebnu osjetljivost hidrološkoga sustava Vranskoga jezera na učestalu pojavu sušnih godina.

U svezi sagledavanja specifičnoga ponašanja hidrološkoga sustava Vranskog jezera, posebno je zanimljiv prikaz trendova hoda godišnjih vrijednosti karakterističnih hidroloških pokazatelja: srednje godišnje razine u jezeru i moru, godišnje količine oborina, srednje godišnje temperature zraka te srednji godišnji protoci na hidrološki kontroliranome površinskom dijelu sliva Vranskoga jezera. Odabrano je razdoblje (1961.-2010.), tj. nisu uzete u obzir zadnje dvije godine zbog mogućega utjecaja izgrađenoga praga na odvodnome kanalu Prosika na dinamiku kolebanja razina vode u jezeru, posebno u sušnim hidrološkim prilikama kakve su bile

tih godina. Dobiveni su vrlo zanimljivi rezultati koji su predloženi kao grafički prikazi hoda karakterističnih vrijednosti izraženih u modularnom obliku (slika 5.31.).

Ti rezultati pružaju dobar uvid ne samo u zabilježene pojave, nego i u mehanizam djelovanja Vranskoga jezera. Vidljivo je da tijekom analiziranoga razdoblja srednje godišnje temperature zraka imaju trend porasta, a godišnje količine oborine trend opadanja. U tom je smislu potpuno razumljivo da i srednji godišnji protoci s hidrološki kontroliranoga dijela sliva imaju trend opadanja koji je u modularnim vrijednostima nešto naglašeniji u odnosu na trend pada godišnjih količina oborina. Vidljivo je dobro slaganje vrijednosti hoda oborina i protoka, s time da su kod protoka naglašenije varijacije njihovih godišnjih vrijednosti.

No, unatoč trendu smanjenja srednjih godišnjih protoka, srednji godišnji vodostaji u Vranskome jezeru imaju trend porasta. Ako se pojednostavljeno gleda, to je potpuno nelogično. No, postoji i vrlo prihvatljivo objašnjenje mogućega uzroka takvoga trenda, a koje je vezano uz trend kolebanja srednjih godišnjih razina mora, koji također ima porast. Upravo zbog trenda porasta razina mora, cijeli sustav krškoga vodonosnika, pa i samo Vransko jezero postupno se diže i uspostavlja se novo ravnotežno stanje između jezera, krškoga vodonosnika i mora. To je model djelovanja priobalnih krških vodonosnika kao odgovor na klimatske promjene/varijacije i njime izazvane poraste razine mora. Za istaknuti je da je na području hrvatskoga krša ovo jedinstven primjer, pa i najizravniji dokaz prisustva i učinaka klimatskih promjena/varijacija na priobalne vodne resurse.

Slika 5.31.

Slika 5.31. Modularne vrijednosti hoda i odgovarajući trendovi karakterističnih godišnjih vrijednosti odabranih hidroloških pokazatelja u vodnom sustavu Vranskog jezera (1961.-2010.)

S obzirom na takvo osobito ponašanje, trend hoda kolebanja srednjih razina Vranskoga jezera bilo je interesantno usporediti s kolebanjima drugih dvaju većih priobalnih jezera, također kriptodepresija smještenih na istom regionalnom prostoru hrvatskog krša – Vranskoga jezera na Cresu te Baćinskih jezera kod Ploča (slika 5.32.). To su jezera za koje u bazi podataka DHMZ-a također postoje vrlo dugi nizovi podataka o kolebanjima razine vode. Sačuvani neprekidni podaci osmatranja vodostaja na Vranskome jezeru na Cresu postoje od 1928. (najprije s postaje Stanić, a od 1978. s postaje CP Vrana). Kod Baćinskih jezera sačuvani su podaci osmatranja vodostaja (na postaji Šipak) još 1923. godine. Nažalost, za početno razdoblje do 1942. ne postoji podatak o koti “0” vodokazne letve. Motrenja su ponovno započela 1945., s prekidom u razdoblju (1959.-1972.), a provode se do današnjih dana. Zanimljivo je da su i na Vranskome jezeru u Dalmaciji motrenja vodostaja uspostavljena prije Drugog svjetskog rata, ali za raspoložive podatke tijekom razdoblja (1929.-1939.) također nema podatka o koti “0” vodokazne letve. Stoga je usporedba dana u nastavku provedena za nejednoliko duga razdoblja njihovih motrenja, ali za koja su na raspolaganju stajali podaci o položajima kota “0” njihovih vodokaznih letava.

Na slici 5.32. prikazani su položaji još dvaju lokaliteta, Bokanjačkoga blata kod Zadra i Blatskoga polja na otoku Korčuli, za koje su također dane usporedbe s

Vranskim jezerom kod Biograda n/m, ali na razini generiranih vrijednosti protoka za razdoblje do 2100. godine.

Slika 5.32.

Slika 5.32. Prikaz položaja Vranskoga jezera na otoku Cresu (1), Bokanjačkoga blata (2), Vranskoga jezera kod Biograda n/m (3), Baćinskih jezera (4) te Blatskoga polja (5)

Vransko jezero na otoku Cresu prirodni je fenomen s volumenom $220 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ slatke vode (maksimalne godišnje koncentracije klorida do oko 80 mgL^{-1}) na inače vodnim pojavama siromašnom otoku Cresu. Jezero nema vidljivih dotoka i otjecanja, srednja razina vode u jezeru je oko 13,1 m n. m., a minimalna 8,56 m n. m. (2012.). Najniža kota dna jezera je na -61,3 ispod srednje razine Jadranskoga mora. Jezero služi kao jedini izvor vodoopskrbe otoka Cresa i Lošinja (Rubinić i Ožanić, 1992; Rubinić i sur. 2011b, Tomas i sur. 2013).

Baćinska jezera čine skupina od šest međusobno povezanih jezera (Oćuša, Crniševo, Podgora, Sladinac, Šipak i Plitko jezero) te jednoga odvojenog (Vrbnik) u neposrednom zaleđu Ploča prema kojima se spojnim tunelom u more provodi višak voda iz jezera. Radi se o jezerima koja su opsežnim hidrotehničkim zahvatima s početka 20. stoljeća ne samo međusobno povezana, već se u njih, također spojnim tunelom, ulijevaju i vode nekadašnjega jezera, a sada Vrgoračkoga polja. Kako bi se smanjilo plavljenje površina u slivu i uz prostor Baćinskih jezera, do sada je bilo nekoliko rekonstrukcija pojedinih objekata hidrotehničkoga sustava. Srednja razina vode na postaji Šipak iznosi 1,4 m n. m., a minimalna 0,37 m n. m. (1985.). Sadržaj

klorida u jezerskoj vodi prati se na jezeru Crniševo i kreće se u vrlo širokom granicama od 4 do 900 mgL⁻¹ (Tomas i sur. 2013).

Na slici 5.33. dan je usporedni prikaz hoda srednjih godišnjih razina vode na spomenutim jezerima za razdoblje nakon Drugoga svjetskog rata. Iako nizovi nisu jednake duljine, s različitim stupnjem korištenja voda i različitim hidrotehničkim zahvatima koji su dijelom mijenjali uvjete otjecanja u jezerima, pa tako i utjecali na dinamiku kolebanja njihovih razina, dani prikaz, iako samo orijentacijski, ipak je zanimljiv. Na Vranskome jezeru na otoku Cresu vidljiv je izražen trend snižavanja srednjih godišnjih vodostaja (4,8 m/100 god), praktički stagnirajući trend kolebanja razine vode uočljiv je na Baćinskim jezerima, dok na Vranskome jezeru kod Biograda n/m postoji blagi trend porasta razine vode (0,21 m/100 god).

Slika 5.33.

Slika 5.33. Usporedni prikaz kolebanja srednjih godišnjih razina vode u analiziranim priobalnim krškim jezerima istočne obale Jadranskoga mora

Uz spomenute različite antropogene razloge koji sigurno imaju utjecaj na veličinu iskazanoga trenda, te na širem regionalnom prostoru prisutan opći trend smanjivanja godišnjih količina oborina i porasta temperature zraka, što uvjetuje i smanjenje godišnjih protoka, neuobičajeni trend kolebanja srednjih godišnjih razina na Vranskome jezeru kod Biograda n/m u velikoj je mjeri posljedica prisutnoga trenda povećanja hoda srednjih godišnjih razina mora, o čemu je bilo riječ u poglavljima 2.3., 5.1., 5.2., 5.3. Iako su sva tri analizirana jezera kriptodepresije, stupanj međudjelovanja s morem im je različit. To se ogleda kako u veličini nadvišenja razine

vode u odnosu na morsku razinu, tako i u stupnju zaslanjenosti njihovih voda. Vransko jezero na otoku Cresu najmanje je izloženo utjecaju dinamike kolebanja mora, a Vransko jezero kod Biograda n/m najvećem takvom utjecaju, što se ogleda i u iskazanome trendu.

Provedena je i usporedna analiza autokorelacijskih funkcija tih jezera, i to srednjih godišnjih razina vode (slika 5.34.) i srednjih dnevnih razina vode (slika 5.35.).

Slika 5.34.

Slika 5.34. Usporedni prikaz autokorelacijskih funkcija srednjih godišnjih razina vode

Slika 5.35.

Slika 5.35. Usporedni prikaz autokorelacijskih funkcija srednjih dnevnih razina vode

Vidljivo je da Vransko jezero na Cresu na razini godišnjih pa i dnevnih podataka ima vrlo stabilnu i sporopadajuću autokorelacijsku funkciju. Ona ukazuje na iznimno dugu međuovisnost hidroloških stanja u njegovu sustavu. Na razini godišnjih podataka, po Manginovu (1884) kriterijumu, ta međuzavisnost iznosi čak dvadeset i četiri godine, a na razini dnevnih podataka, uveliko premašuje 365 dana, do koliko se je u danome primjeru iskazivala vrijednost autokorelacijskih funkcija. Kod Baćinskih jezera godišnja autokorelacijska funkcija pokazuje međuzavisnost do petoga koraka, a kod Vranskoga jezera kod Biograda n/m praktički se već u prvome koraku gubi značajna povezanost srednjih godišnjih podataka o razinama vode u jezeru. Rezultati analize autokorelacijskih funkcija srednjih dnevnih razina vode pokazuju da je kod

Baćinskih jezera ta međuzavisnost duga 92 koraka (dana), a kod Vranskoga jezera kod Biograda n/m još i kraća – samo 70 dana. To znači veliku osjetljivost jezerskoga sustava Vranskoga jezera kod Biograda n/m na pojave iznimnih hidroloških prilika, posebno suša te da se iznimno niske razine vode u jezeru mogu javiti i u prilikama nakon situacija prethodno povoljnih sezonskih vodnih razdoblja.

Na kraju regionalnih usporedbi hidroloških značajki jezera istočne obale Jadrana provedena je i usporedba prognoziranih vrijednosti srednjih godišnjih dotoka za dva planska karakteristična 30-godišnja razdoblja: (2021.-2050.) te (2071.-2100.). Pritom su takve procjene dane (osim za Vransko jezero u Dalmaciji, čiji su rezultati obrada sadržani u poglavlju 5.3.4.), i za Vransko jezero na Cresu, kao i za dva nekadašnja jezera, a nakon prokopa tunela kojima su odvedene površinske vode sada vodocrpilišta podzemnih voda – Bokanjačko blato kod Zadra te Blatsko polje na Korčuli. Po metodologiji razvijenoj u ovome doktorskom radu (poglavlje 3.5.), u okviru EU projekta CCWATERS, provedene su analize srednjih godišnjih protoka do 2100. godine (Rubinić i sur., 2011b; 2001c; 2011d). Rezultati tih obrada – srednji godišnji protoci za odabrana razdoblja po provedenim hidrološkim modeliranjima kojima su ulazne vrijednosti činile predviđene klimatološke vrijednosti po modelima RegCM3 i Aladin, uspoređeni su s podacima povijesnih nizova dotoka (1961.-1990.) te su prikazani u tablici 5.20.

Iz prikazanih je rezultata vidljivo da je kod svih analiziranih vodnih resursa za oba planska razdoblja u 21. stoljeću i po oba korištena modela za generiranje ulaznih podataka dobiveno smanjenje srednjih godišnjih vrijednosti dotoka. Izuzetak je Vransko jezero na Cresu za razdoblje (2021.-2050.). Kod njega dobivene procjene govore o zanemarivo malim povećanjima srednjih godišnjih protoka u odnosu na protoke iz povijesnoga 30-godišnjeg razdoblja (1961.-1990.).

Tablica 5.20. Prikaz odstupanja (u %) osnovnih statističkih značajki generiranih 30-godišnjih vremenskih nizova podataka o srednjim godišnjim dotocima analiziranih jezera u odnosu na povijesni niz (1961.–1990.)

	Vransko jezero – Dalmacija (%)	Vransko jezero – Cres (%)	Bokanjačko blato (%)	Blatsko polje (%)
Niz (2021.-2050.)				
Modelirani niz /RegCM3/	-7,9	3,6	-8,1	-9,8
Modelirani niz /Aladin/	-13,7	3,4	-11,1	-18,2
Niz (2071.-2100.)				
Modelirani niz /RegCM3/	-23,5	-0,5	-32,1	-30,0
Modelirani niz /Aladin/	-47,3	-28,2	-38,5	-47,0

Ovisno o modelu kojim su generirani ulazni podaci klimatoloških vrijednosti, dobiveni rezultati za Vransko jezero kod Biograda n/m kreću se između -7,9 i -13,7 % za razdoblje (2021.-2050.), te čak između -23,5 i -47,3 % za 30-godišnje razdoblje na kraju 21. stoljeća (2071.-2100.). Ti su rezultati vrlo nepovoljni u odnosu na ostale analizirane lokalitete, izuzev kod Blatskoga polja gdje su dobiveni rezultat slični, pa čak i nepovoljniji nego u slučaju samoga Vranskog jezera kod Biograda n/m. Iako je raspon prognoziranih vrijednosti po oba modela ulaznih podataka vrlo širok, radi se o zabrinjavajućim očekivanjima, posebno zbog okolnosti da su i već prisutna očitovanja klimatskih promjena/varijacija na Vranskome jezeru kod Biograda n/m izazvale vrlo velike probleme s kakvoćom voda – izraženijim prodorima zaslanjene morske vode u jezero i njegov krški vodonosnik.

5.6. Modeliranje utjecaja mogućih promjena u sustavu Vranskog jezera na kolebanje razina i zaslanjenje njegovih voda

Vransko jezero je, kao što je u prethodnim poglavljima prikazano, vrlo složen hidrološki sustav čije je ponašanje uvjetovano nizom utjecajnih čimbenika, od kojih se samo neki mogu hidrološki promotriti. U takvim je okolnostima za bolje razumijevanje djelovanja jezerskoga sustava primjerena upotreba modela koji bi povezali i kvantificirali međudnose između promjena stanja u jezeru i promotrivih utjecajnih hidroloških čimbenika u sadašnjim hidrološkim prilikama, ali i za prognozirane promjene dotoka, temperature zraka i slično. Iskustva sa sličnim problemima ukazala su na to da primjena metoda strojnoga učenja, odnosno modela zasnovanih na konceptu neuronskih mreža i regresijskih stabala, može osigurati djelotvoran programski okvir za realizaciju i tako zahtjevnih modelskih zadataka kao što je procjena razina vode u jezeru i stanja zaslanjenosti. U ovome je radu pritom rješavano nekoliko razina modelskih zadataka – modelska analiza dosadašnjega kolebanja jezerskoga sustava i izdvajanja najutjecajnijih pokazatelja koji utječu na promjene stanja razine vode u jezeru, modelske analize dinamike zaslanjivanja jezerskoga sustava te izrada prognostičkih modela za ocjenu stanja razina vode u jezeru i njegove slanosti u promijenjenim hidrološkim prilikama.

Modeli toga tipa koji su primijenjeni u ovome radu korištenjem programskoga paketa WEKA 3.7. obrazloženi su u poglavljima 3.7.-3.9. Oni imaju visok stupanj prilagođavanja rješavanju različitih tipova problemskih zadataka i iznimno velike programske mogućnosti obrade različitih vrsta ulaznih podataka. Stoga uspješnost modeliranja u znatno većoj mjeri ovisi o raspoloživosti nizova ulaznih podataka i njihovom primjerenom odabiru, odnosno umješnosti modelara da prepozna moguće

utjecajne međuodnose, nego što na same rezultate mogu imati utjecaj moguća programska ograničenja. Nužno je odabrati međusobno nezavisne uzorke/nizove podataka utjecajnih čimbenika kao ulaznih veličina u modelski blok za treniranje – estimaciju parametara modela neovisno o tome radi li se o modelima iz područja neuronskih mreža ili regresijskih stabala. Unutar bloka se oko 10 % podataka koristi za validaciju modela. Isto tako, nužno je izdvojiti i oko 20 % raspoloživih podataka i za testiranje modela. Pritom valja voditi računa da se testiranje ne provodi na ekstremnijim situacijama, nego što su situacije na kojima je istrenirana neuronska mreža ili model regresijskog stabla.

Kod svih provedenih modeliranja, kao testno razdoblje korišteni su podaci iz 2006. do 2008. Na kraju toga razdoblja zapažene su vrlo niske razine vode u jezeru (poglavlje 5.2.) i vrlo visoki sadržaji klorida u jezerskoj vodi (poglavlje 5.4.). No, ti su se ekstremi spomenutih godina javili ipak u nešto blažoj mjeri nego tijekom ekstremno sušne 2012. godine čiji su podaci u svim analiziranim slučajevima bili uključeni u niz podataka za treniranje. Podaci iz razdoblja od 2000. do 2005. i od 2009. do 2012. korišteni su za treniranje te na osnovi toga za generiranje i validaciju tako generiranih modela strojnoga učenja. Sama validacija provedena je kao unakrsna validacija (*engl. cross validation*) na 10 % raspoloživih podataka od skupa za treniranje.

Podaci koji su korišteni pri provedenim analizama su nizovi srednjih dnevnih podataka o razinama vode u jezeru, razinama mora, srednjim dnevnim razlikama razina vode u jezeru i moru, površinskim dotocima u jezero kanalom Kotarka, temperaturama zraka na klimatološkoj postaji Biograd na moru, kao i iz njih izvedene veličine – njihove osrednjene vrijednosti za različita trajanja u rasponu između 3 i 365 prethodnih dana, postupno međusobno pomicanih. Naime, radi osiguranja

nezavisnosti vremenskih nizova podataka, osrednjavanje je napravljeno tako da članovi pojedinih nizova ulaznih podataka u istome koraku ne sadržavaju iste članove osrednjenih nizova, nego su oni međusobno pomaknuti. Tako, na primjer, niz srednjih sedmodnevnih podataka o razinama vode u Vranskome jezeru ne sadržava i srednje trodnevne podatke koji su prethodili nekoj od analiziranih situacija, već obuhvaća razdoblje koje je prethodilo tom trodnevnom nizu, odnosno razdoblje između desetoga i četvrtoga od prethodnih dana. Na istovrstan način postupno su pomaknuti i drugi analizirani prosjeci koji su navedeni kao informacije o ulaznim varijablama za svaku od modelskih obrada. Time je dobiveno to da se stanje u jezerskome sustavu može vezivati i za hidrološke prilike koje su mu prethodile tijekom duljega vremenskog razdoblja – u nekima od analiziranih slučajeva (modeliranje sadržaja klorida u jezerskoj vodi) čak do dvije godine, što je važno zato jer je provedenim analizama autokorelacijskih funkcija utvrđeno da zasljenjenost jezera, odnosno sadržaj klorida u jezerskoj vodi, pokazuje da postoji međuovisnost sa stanjima iz nizova duljim od godine dana, odnosno ima vremenski korak od šesnaest mjeseci.

U nekim slučajevima kao ulazni podaci korištene su i srednje 30-dnevne vrijednosti ulaznih varijabli, postupno pomaknute do osamnaest mjeseci unatrag. Uz to su kao nizovi ulaznih podataka korišteni i rezultati provedenih analiza sadržaja klorida na trima postajama u jezeru kojima su onda pridruživani nizovi gore spomenutih hidroloških podataka, kako dnevnih tako i prosječnih za prethodno spomenuta razdoblja različitih trajanja. Pri formiranju ulaznih podataka za pojedina modeliranja izostavljani su nizovi koji su neposredno povezani s varijablom za koju su provođena modeliranja ili su pak međusobno neposredno povezani. U nekim pak slučajevima to nije bilo moguće zato što u određenoj mjeri zapravo postoji opća povezanost između svih ulaznih podataka. Tako su s temperaturama zraka globalno

povezani i dotoci u jezerski sustav, razine jezera i mora, te na duljoj vremenskoj skali i ne bi bilo moguće oblikovati potpuno nezavisne nizove ulaznih podataka. No, takav je globalni utjecaj manje značajan kada se razmatraju unutargodišnje promjene stanja jezerskoga sustava u situaciji mogućih smanjenih dotoka i povećanih temperatura zraka.

Stoga su modeliranja ipak provedena na prikazani način, pri čemu se u diskusiji rezultata vodilo računa i o mogućim globalnim utjecajima klimatskih promjena/varijacija. Naime, cilj modelskih obrada u ovome radu nije bio osigurati apsolutne točne ili njima bliske procjene modeliranih varijabli, što nije ni moguće, već prije svega prikazati scenarije mogućih promjena razina vode i sadržaja klorida koje bi se mogle dogoditi u budućnosti ukoliko se ostvare predviđanja o mogućim promjenama utjecajnih hidroloških elemenata. Uostalom, i sami rezultati klimatoloških procjena mogućih promjena temperature zraka i oborina po različitim klimatskim modelima korištenima u ovome doktorskom radu (poglavlje 3.5.) daju vrlo različite rezultate veličina mogućih promjena.

U okviru ovoga poglavlja modelirana su četiri scenarija mogućih promjena vezanih uz rezultate procjena klimatskih promjena u smislu predviđenih porasta temperatura zraka koje je iznio DHMZ (2010) i koji su prikazani u poglavlju 3.5. te procjena smanjenja dotoka u jezero provedenih u ovome doktorskom radu zbog takvih klimatskih utjecaja (poglavlje 5.3.4.). Spomenuti su rezultati dobiveni pomoću klimatskih modela RegCM3 i Aladin za dva karakteristična razdoblja: od 2021. do 2050. i od 2071. do 2100. Kao pokazatelji međuodnosa u usporedbi s postojećim stanjem klimatskih i hidroloških prilika uzeta su odstupanja srednjih vrijednosti temperatura zraka (dana u postocima) i ukupnih dotoka tijekom spomenutih karakterističnih razdoblja (prikazana u tablici 5.21.) u odnosu na referentno klimatsko

razdoblje (1961.-1990.). Tim su postocima smanjeni zabilježeni podaci te su provedena modeliranja utjecaja tih promjena na razine voda u Vranskome jezeru na postaji Crkvine kamp. Pritom je korišteno isto testno razdoblje koje je korišteno i za testiranje tih modela prilikom njihova razvoja (2006.-2008.). Zadržalo se na globalnim – godišnjim promjenama i nije se dublje ulazilo u moguće promjene unutargodišnje raspodjele temperatura zraka i ukupnih dotoka u Vransko jezero, a prihvaćena je i postavka da se dobiveni međuodnosi promjena ukupnih dotoka u jezerski sustav u različitim klimatskim scenarijima mogu primijeniti i na rezultate dotoka s hidrološki kontroliranoga dijela sliva Vranskoga jezera (površinskoga i dijela iz koga se podzemne vode prazne putem izvorišta na rubu Vranskoga polja).

Tablica 5.21. Prikaz odstupanja (u %) karakterističnih pokazatelja odabranih scenarija različitih klimatskih prilika u odnosu na odgovarajuće podatke iz razdoblja (1961.-1990.)

Redni broj	Razdoblje obrade	Klimatski model	Razlika	Razlika protoka
1	2021.-2050.	RegCM3	+ 8,0	-7,9
2	2021.-2050.	Aladin	+ 11,0	-13,7
3	2071.-2100.	RegCM3	+ 22,0	-25,5
4	2071.-2100.	Aladin	+ 24,0	47,3

U svim modeliranim situacijama korišteni su i modeli neuronskih mreža i regresijskih stabala odlučivanja pri čemu su iterativno, u toku postupka odabira optimalnoga modela, varirane različite modelske postavke – parametri samoga modela, kao i različit obuhvat nizova ulaznih podataka. Naime, pokazalo se da velik broj ulaznih varijabli u nekim slučajevima jako osložnjava model regresijskoga stabla, a ujedno ne nosi i kvalitativnu dobit – bolju prilagodbu dobivenih rezultata testnim

vrijednostima. U okviru poglavlja 5.6.1. i 5.6.2. u načelu su prikazani dobiveni rezultati koji su se na osnovi testiranja (prema ocjenskim pokazateljima sadržanim u poglavlju 3.7.) pokazali prihvatljivijima, neovisno o tome radi li se o neuronskim mrežama ili regresijskim stablima. Ipak, u slučajevima kada se osim modeliranih vrijednosti dobivenih primjenom modela neuronskih mreža željelo pokazati i strukturu najutjecajnijih ulaznih varijabli kakve se izdvajaju pri primjeni modela regresijskih stabala, prikazani su rezultati dobiveni po oba modelska pristupa.

Rezultati provedenih modeliranja prikazani su u grafičkom obliku – kao usporedba izmjerenih i modelom proračunatih vrijednosti, dok su u tabličnim prikazima dane i značajke samih parametara modela, kao i rezultati provedenih testiranja izmjerenih i modelom proračunatih vrijednosti na testnom slivu.

Pri ocjeni podudarnosti izmjerenih i modelom proračunatih vrijednosti srednjih dnevnih razina vode u jezeru valja voditi računa o tome da na njih imaju utjecaj i unutardnevne oscilacije jezera koje nisu vezane uz promjenu hidroloških prilika u jezerskom sustavu, već su posljedica premještanja vodnih masa zbog usmjerenih strujanja vjetra ili vlastitih unutardnevnih oscilacija jezera uslijed plime i oseke čije se periode ne javljaju u isto vrijeme unutar 24-satnih vremenskih intervala. Te razlike obično iznose 1-3 cm, pri jačim strujanjima vjetra 4-5 cm, a iznimno i koji centimetar više. Stoga su odstupanja rezultata do 5 cm sasvim u okvirima točnosti izmjerenih ulaznih podataka o srednjim dnevnim razinama vode u jezeru. Ukoliko se stanja razina promatraju u duljim vremenskim intervalima, razlike između pojedinačnih dnevnih vrijednosti koje proizlaze iz prethodno spomenutih razloga mogu se ublažiti. To je prikazano na prvom od prikaza međuodnosa izmjerenih i modelom proračunatih vrijednosti (slika 5.21., tablica 5.22.) gdje su, uz nizove

izmjerenih i modelom dobivenih dnevnih pojedinačnih vrijednosti, prikazani i nizovi podataka sastavljenih kao njihovi klizni 30-dnevni prosjeci.

Zbog vrlo maloga broja podataka o pojavama izraženijih zaslanjivanja jezerske vode, odnosno sadržaja klorida, modeliranja sadržaja klorida u izmijenjenim klimatskim uvjetima nisu dala prihvatljive rezultate. To je posljedica rijetkih, uglavnom mjesečnih, a u novije doba čak i samo dvomjesečnih uzorkovanja kakvoće voda (30-60 puta manje slučajeva za treniranje nego li u slučajevima provedenog modeliranja dinamike kolebanja srednjih dnevnih razina vode u jezeru) te nemogućnosti primjerene ekstrapolacije ponašanja jezera izvan uvjeta u kojima je provedeno treniranje modela. No, i provedena modeliranja sadržaja klorida u postojećim uvjetima osigurala su vrijedna dodatna saznanja o procesima zaslanjivanja jezerskoga sustava i uz to vezanim utjecajnim čimbenicima.

5.6.1. Modeliranje kolebanja razine vode u jezeru u postojećim hidrološkim prilikama

Razina vode u Vranskome jezeru rezultat je odnosa više utjecajnih elemenata – stanja razine u nekome prethodnom vremenskom koraku te površinskih i podzemnih dotoka, isparavanja, istjecanja i gubitaka vode na poniranje. Opće bilančne postavke i rezultati provedenih bilanciranja na mjesečnoj razini opisa procesa sadržani su u poglavlju 5.3.3. gdje je i zaključeno da je vrlo teško razdvojiti komponente podzemnih dotoka i podzemnih gubitaka iz jezera, pa su one zbirno prikazane, a njihove veličine procijenjene samo na razini globalne vodne bilance (poglavlje 5.3.2.). Kako bi se, unatoč nepoznavanju tih vrlo važnih elemenata vodne bilance, moglo analizirati, pa i predviđati ponašanje jezerskoga sustava – kolebanje razine vode u

jezeru pod utjecajem hidrološki promotrivih utjecajnih čimbenika, provedena su i modeliranja metodama strojnoga učenja. Rezultati su prikazani u ovome poglavlju.

Kao prvi korak provedena su modeliranja kolebanja razine vode ovisno o hidrološkim prilikama. Rezultati tih obrada – usporedni prikaz izmjerenih i modelom neuronskih mreža proračunatih srednjih dnevnih razina vode za testno razdoblje od 2006. do 2008. – prikazani su na slici 5.36. U tablici 5.22. prikazani su parametri i karakteristični rezultati odabranog modela koji je između niza provedenih modeliranja s različitim parametrima modela neuronskim mreža i regresijskih stabala odabran kao najprimjereniji.

Iz slike 5.36. vidljivo je da je prilikom modeliranja postignut vrlo velik stupanj podudarnosti između izmjerenih podataka srednjih dnevnih vodostaja u Vranskome jezeru i modelom neuronskih mreža proračunatih vrijednosti u istim vremenskim razdobljima, kao i analiziranih vodostaja po čitavoj amplitudi, posebno njihovih ekstremnih vrijednosti, iako prilikom modeliranja uopće nisu korišteni ulazni podaci koji u sebi sadrže razine vode u jezeru. Također je vidljivo da su najveće razlike između modelom proračunatih i izmjerenih vrijednosti zapažene kod podataka iz 2007. kada su sredinom sušnoga razdoblja vrijednosti razina vode u jezeru bile dvadesetak centimetara više od izmjerenih. To se može tumačiti nedovoljnim brojem primjera za treniranje sa sličnim vremenskim prilikama i promjenjivim utjecajem dotoka podzemnih voda čije značajke pojava, zbog nemogućnosti njihove hidrološke procjene uslijed nedostatka mjerenja tijekom razdoblja treniranja i validacije mreže, nisu mogle biti sadržane u modelu kao jedna od ulaznih varijabli. Vremenska podudarnost izmjerenih i proračunatih razina vode puno je bolja u slučajevima visokih razina vode u jezeru, što je posljedica dominantnoga utjecaja hidrološki kontroliranih dotoka na stanje razina vode u jezeru.

Slika 5.36.

Slika 5.36. Usporedni prikaz izmjerenih i modelom neuronskih mreža proračunatih vrijednosti srednjih dnevnih razina vode u Vranskom jezeru za testno razdoblje (2006.-2008.)

Tablica 5.22. Prikaz osnovnih rezultata provedenih modeliranja srednjih dnevnih razina vode u Vranskom jezeru za testno razdoblje (2006.-2008.)

Tip modela:		Neuronska mreža – ML Perceptron	
<i>Ulazne varijable odabranog modela:</i>			
- Ukupni površinski dotoci – s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150 i 365 prethodnih dana			
- Razine mora – s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150 i 365 prethodnih dana			
- Temperature zraka s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150 i 365 prethodnih dana			
Analizirano razdoblje treniranja i validacije modela (1997.-2005.) i (2009.-2012.)			
Parametri modela:			
Koeficijent brzine učenja: 0,5		Broj skrivenih slojeva: automatski određen	
Moment: 0,2		Broj epoha: 3000	
Rezultati testiranja modela:			
Koeficijent korelacije: 0,9767			
Srednja apsolutna pogreška: 0,0878		Relativna apsolutna pogreška: 17,12 %	
Korijen iz srednje kvadratne pogreške: 0,1165		Korijen iz relativne kvadratne pogreške: 24,40 %	
Usporedba osnovnih pokazatelja niza izmjerenih podataka i podataka dobivenog modelom:			
Razine vode (m n. m.)	Iz izmjerenih podataka:	Iz podataka proračunatih modelom:	
SR	0,67	0,66	
MAX	2,06	2,18	
MIN	0,03	0,03	
SR (30-dnevni maksimum)	1,99	1,99	
SR (30-dnevni minimum)	0,06	0,06	

Provedeno je i modeliranje, odnosno procjena stanja razine vode u jezeru za 90, 180, te 270 dana unaprijed (slika 5.37., tablice 5.23.-5.25.), ovisno o stanju u

jezeru u nultome početnome koraku te hidrološkim prilikama (razine vode u jezeru i moru, dotoci i temperature zraka za odabrana karakteristična vremenska razdoblja koja su prethodile tome početnome koraku, kao i mjesečnim dotocima i temperaturama zraka). Modeliranja su provedena kako bi se moglo udovoljiti uobičajenim hidrološkim zadacima sezonskih prognoza stanja za tri do devet mjeseci unaprijed, vodeći računa o trenutnim razinama vode u jezeru. Cilj je bio da se na ovako razvijenome i testiranome modelu, u sljedećem koraku modeliranja, promjenom ulaznih podataka o hidrološki kontroliranim dotocima u jezero i temperaturama zraka za nekoliko klimatskih scenarija (tablica 5.21.), dobiju prognoze mogućih promjena stanja razina vode u jezeru. Posebno su interesantna stanja niskih razina vode u Vranskome jezeru, tijekom kojih dolazi do problema s povećanim prodorima zaslanjene morske vode u jezerski sustav.

Slika 5.37.

Slika 5.37. Usporedni prikaz izmjerenih podataka o srednjim dnevnim razinama vode u Vranskome jezeru te podataka njihovih procjena odabranim modelima neuronskih mreža s vremenskim pomakom od 3, 6 i 9 mjeseci za testno razdoblje (2006.-2008.)

Iz danih je prikaza (slika 5.37., tablica 5.23.) vidljivo da i u ovome slučaju postoji dobra podudarnost izmjerenih i odabranim modelom neuronskih mreža proračunatih vrijednosti razina vode u Vranskome jezeru tijekom testnoga razdoblja, s time da su i u danome primjeru uočena nešto veća odstupanja (do dvadesetak centimetara) tijekom sušnoga razdoblja 2007. godine. Odabrani modeli neuronskih mreža omogućavaju prognozu stanja razina vode u jezeru za narednih 3-9 mjeseci

ukoliko se raspolaže podacima o stanju hidroloških prilika unazad godinu i pol dana, kao i prognozama temperatura zraka i dotoka s hidrološki kontroliranoga dijela sliva Vranskoga jezera za to razdoblje.

Dobra prilagodba procijenjenih vrijednosti razina vode u jezeru u odnosu na izmjerene vrijednosti nije postignuta toliko u vremenu nastupa najzanimljivijih pojava - ekstremnih sezonskih minimuma - koliko u pogledu procjene njihovih apsolutnih vrijednosti. Razlike između prognoziranih i izmjerenih vrijednosti sezonskih minimuma kreću se, ovisno o analiziranom slučaju vremenskoga pomaka predviđanja stanja razina vode u jezeru, u rasponu do najviše 5-6 cm, što pruža dovoljnu sigurnost za provedbu aktivnoga upravljanja razinama vode u jezeru regulacijom istjecanja u more kanalom Prosika.

Tablica 5.23. Prikaz osnovnih rezultata modeliranja srednjih dnevnih razina vode u Vranskome jezeru s vremenskim pomakom od 3, 6 i 9 mjeseci za testno razdoblje (2006.-2008.)

Tip modela:		Neuronska mreža – ML Perceptron		
<i>Ulazne varijable odabranoga modela:</i>				
- Razine vode u jezeru – prethodnih 90 (180 ili 270 dana), te nadalje postupno unazad 15 puta po 30-mjesečnih prosjeka				
- Ukupni površinski dotoci – postupno unazad 15 puta po 30-mjesečnih prosjeka				
- Razine mora – prethodnih 90 dana, te nadalje sukcesivno unazad 15 puta po 30-mjesečnih prosjeka				
- Temperature zraka – postupno unazad 15 puta po 30-mjesečnih prosjeka				
- Analizirano razdoblje treniranja i validacije modela (1998.-2005.) i (2009.-2012.)				
Parametri modela za pomak 3 mjeseca:				
Koeficijent brzine učenja: 0,1		Broj skrivenih slojeva: automatski određen		
Moment: 0,2		Broj epoha: 2000		
Rezultati testiranja modela za pomak 3 mjeseca:				
Koeficijent korelacije: 0,9635				
Srednja apsolutna pogreška: 0,134		Relativna apsolutna pogreška: 26,55 %		
Korijen iz srednje kvadratne pogreške: 0,1618		Korijen iz relativne kvadratne pogreške: 28,62 %		
Parametri modela za pomak 6 mjeseci:				
Koeficijent brzine učenja: 0,1		Broj skrivenih slojeva: automatski određen		
Moment: 0,2		Broj epoha: 100		
Rezultati testiranja modela za pomak 6 mjeseci:				
Koeficijent korelacije: 0,9603				
Srednja apsolutna pogreška: 0,1328		Relativna apsolutna pogreška: 26,31 %		
Korijen iz srednje kvadratne pogreške: 0,1615		Korijen iz relativne kvadratne pogreške: 28,58 %		
Parametri modela za pomak 9 mjeseci:				
Koeficijent brzine učenja: 0,1		Broj skrivenih slojeva: automatski određen		
Moment: 0,2		Broj epoha: 50		
Rezultati testiranja modela za pomak 9 mjeseci:				
Koeficijent korelacije: 0,9504				
Srednja apsolutna pogreška: 0,1447		Relativna apsolutna pogreška: 28,65 %		
Korijen iz srednje kvadratne pogreške: 0,1703		Korijen iz relativne kvadratne pogreške: 30,13 %		
Usporedba osnovnih pokazatelja niza izmjerenih podataka razina vode (u m)				
Pokazatelj	Izmjereno	Proračunato za pomak od 3 mj.	Proračunato za pomak od 6 mj.	Proračunato za pomak od 9 mj.
SR	0,67	0,75	0,75	0,73
MAX	2,05	2,13	1,99	2,10
MIN	0,03	0,04	0,01	0,08

5.6.2. Modeliranje zaslanjenja vode u jezeru

Prvi je korak pri modeliranju zaslanjenja vode u jezeru bio analiza utjecaja pojedinih čimbenika na stanje zaslanjenja/sadržaja klorida u pojedinim dijelovima jezera. Kao što je u poglavlju 5.4. istaknuto, iako s manjim vršnim sadržajima klorida u odnosu na Prosiku, reprezentativno mjesto monitoringa za ocjenu stupnja zaslanjenja cjelokupnoga sustava Vranskoga jezera je postaja Crkvine kamp. Ta se postaja nalazi na otvorenome dijelu jezera ispred Vranskoga polja i ušća kanala Kotarke, na suprotnome dijelu jezera od spomenutoga lokaliteta Prosika, odakle se odvija najintenzivniji unos zaslanjene morske vode u jezerski sustav i rasprostiranje po jezeru (slika 3.1.). Zbog toga je modeliranje sadržaja klorida na postaji Crkvine kamp provedeno tako da su kao ulazne varijable sadržaja klorida s te postaje korišteni i podaci o zabilježenim sadržajima klorida na drugim dvjema spomenutim postajama (Kotarka ušće i Prosika), kao i niz drugih potencijalno utjecajnih hidroloških čimbenika - srednje dnevne razine jezera i mora i njihove razlike, ukupni hidrološki kontrolirani dotoci i temperature zraka u prilikama uzorkovanja te njihove prosječne vrijednosti tijekom odabranih razdoblja koja su im prethodila - s trajanjima 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 dana, postupno pomaknutih unatrag.

U tablici 5.24. prikazane su značajke modela i rezultati testiranja u razdoblju od 2006. do 2008. Odabrani model regresijskoga stabla generirao je jednu jedinu regresijsku jednadžbu za ocjenu sadržaja klorida na postaji Crkvine kamp definiranu na razdoblju treniranja modela od 2000. do 2005. i od 2009. do 2012. te je ona dana u tablici 5.25. Usporedni prikaz izmjerenih rezultata tijekom razdoblja testiranja, kao i spomenutim modelom regresijskoga stabla definiranih vrijednosti sadržaja klorida, dan je na slici 5.38. Toj su slici pridruženi i rezultati provedenih modeliranja

odabranim modelom neuronske mreže za koju su pak parametri modela i rezultati testiranja sadržani u tablici 5.26.

Tablica 5.24. Prikaz osnovnih rezultata modeliranja sadržaja klorida u Vranskome jezeru na mjernejoj postaji Crkvine kamp ovisno o sadržaju klorida na postajama Prosika i Kotarka kamp te i o drugim utjecajnim čimbenicima modelom regresijskog stabla

Tip modela:		Regresijsko stablo – M5P	
<i>Ulazne varijable odabranoga modela:</i>			
- Sadržaji klorida na mjernim postajama Prosika i Kotarka ušće u istom terminu			
- Razine vode u jezeru – s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
- Ukupni površinski dotoci – s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
- Razine mora – s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
- Razlike razina vode u jezeru i moru - s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
- Temperature zraka - sa postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
Analizirano razdoblje treniranja i validacije modela (2000.-2005.) (2009.-2012.)			
Rezultati testiranja modela:			
Koeficijent korelacije: 0,939			
Srednja apsolutna pogreška: 302,02		Relativna apsolutna pogreška: 30,12 %	
Korijen iz srednje kvadratne pogreške: 462,31		Korijen iz relativne kvadratne pogreške: 39,87 %	
Usporedba osnovnih pokazatelja niza izmjerenih podataka i podataka dobivenoga modelom:			
Sadržaj klorida (mgL ⁻¹)	Iz izmjerenih podataka:	Iz podataka proračunatih modelom:	
SR	1273	1471	
MAX	4100	4590	
MIN	201	272	

Tablica 5.25. Prikaz regresijske jednadžbe sadržane u modelu regresijskoga stabla za ocjenu sadržaja klorida na postaji Crkvine kamp

Oznaka jednadžbe	Oblik jednadžbe – Zavisna varijabla sadržaj klorida na postaji Crkvine kamp (mgL ⁻¹)		
Jed. 1	= 0,6022 * 2 - 367,2724 * 6 + 179,3804 * 8 - 78,234 * 30 - 157,8577 * 46 + 7.451,0		
Utjecajni čimbenici:			
2	Prosika kloridi (mgL ⁻¹)	30	Srednji ukupni površ. dotoci prethodnih 365 dana [#] (m ³ s ⁻¹)
6	Srednja razlika razine jezera i mora prethodna 7 dana [#] (m)	46	Srednja razina mora prethodnih 90 dana [#] (m n. m.)
8	Srednja razlika razine jezera i mora prethodnih 30 dana [#] (m)		

Napomena: [#] srednje dnevne vrijednosti navedenih trajanja odnose se na razdoblja prethodnih, postupno pomaknutih intervala od 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150 i 365 dana.

Tablica 5.26. Prikaz osnovnih rezultata modeliranja sadržaja klorida u Vranskome jezeru na mjernejoj postaji Crkvine kamp ovisno o sadržaju klorida na postajama Prosika i Kotarka te i o drugim utjecajnim čimbenicima modelom neuronske mreže

Tip modela:	Neuronska mreža – ML Perceptron	
<i>Ulazne varijable odabranog modela:</i>		
- Sadržaji klorida na mjernim postajama Prosika i Kotarka ušće u istom terminu		
- Razine vode u jezeru – s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana		
- Ukupni površinski dotoci – s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana		
- Razine mora – s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana		
- Razlike razina vode u jezeru i moru - s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana		
- Temperature zraka - sa sukcesivnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana		
Analizirano razdoblje treniranja i validacije modela (2000.-2005.) (2009.-2012.)		
<i>Parametri modela:</i>		
Koeficijent brzine učenja: 0,1	Broj skrivenih slojeva: automatski određen	
Moment: 0,2	Broj epoha: 50	
<i>Rezultati testiranja modela:</i>		
Koeficijent korelacije: 0,9449		

Srednja apsolutna pogreška: 282,1		Relativna apsolutna pogreška: 28,13 %
Korijen iz srednje kvadratne pogreške: 391,4		Korijen iz relativne kvadratne pogreške: 33,76 %
<i>Usporedba osnovnih pokazatelja niza izmjerenih podataka i podataka dobivenog modelom:</i>		
Sadržaj klorida (mgL ⁻¹)	Iz izmjerenih podataka:	Iz podataka proračunatih modelom:
SR	1273	1378
MAX	4100	3909
MIN	201	195

Slika 5.38.

Slika 5.38. Usporedni prikaz izmjerenih i modelima regresijskoga stabla i neuronskih mreža proračunatih vrijednosti sadržaja klorida u Vranskome jezeru na mjernoj postaji Crkvine kamp u ovisnosti o sadržaju klorida na postajama Prosika i Kotarka ušće, kao i drugim utjecajnim čimbenicima, za testno razdoblje (2006.-2008.)

Iz prikaza je vidljivo da su odabranim modelima regresijskoga stabla i neuronskih mreža za testno razdoblje dobro prognozirane vrijednosti sadržaja klorida u odnosu na izmjerene koncentracije prilikom provedenih uzorkovanja. Vidljivo je da nešto manja odstupanja, pogotovo u pogledu procjene vršnih koncentracija, daje model neuronskih mreža. No, i rezultati dobiveni odabranim modelom regresijskoga stabla vrlo su zanimljivi jer daju uvid u strukturu utjecaja analiziranih čimbenika na sam rezultat – sadržaj klorida na mjernoj postaji Crkvine kamp. Naime, model regresijskih stabala generirao je samo jednu regresijsku jednadžbu (tablica 5.25.) prema kojoj dominantan utjecaj na sadržaj klorida na postaji Crkvine kamp ima sadržaj klorida na postaji Prosika, dok utjecaj sadržaja klorida na postaji Kotarka ušće model nije prepoznao kao važan utjecaj. Time su potvrđeni zaključci iz poglavlja 5.4. prema kojima se mehanizam zaslanjivanja jezerskoga sustava naglašeno odvija upravo iz smjera gdje su putovi prodora mora u krški vodonosnik i sam jezerski

sustav najotvoreniji. Uz sadržaj klorida na postaji Prosika, model je kao dominantne čimbenike izdvojio ukupne dotoke u jezero (izražene kao srednje 365-dnevne protoke) tijekom godine koja je prethodila razmatranoj (zbog postupnoga izdvajanja odabranih trajanja spomenuto razdoblje odnosi se na razdoblje između 356. i 721. dana koje je prethodilo analiziranoj pojavi), srednju 90-dnevnu razinu mora (u razdoblju između 116. i 206. dana), kao i srednje 7-dnevne i 30-dnevne razlike razine vode u jezeru i moru tijekom nešto bližih razdoblja.

S obzirom na značenje procesa zaslanjivanja za opstojnost jezerskoga sustava, bilo je zanimljivo provesti i modeliranja sadržaja klorida na svim trima mjernim postajama, ali ovaj puta neovisno gledajući svaku od njih. Dakle, nije se uzimao u obzir stupanj zaslanjenja na ostale dvije postaje, nego se je sadržaj klorida dovodio u vezu isključivo s mogućim utjecajnim hidrološkim čimbenicima kao što su površinski dotoci u jezerski sustav, razine vode u jezeru i moru i njihove razlike te temperature zraka. Pritom su ulazni nizovi podataka određeni s prosječnim vrijednostima različitih trajanja spomenuti i u prethodnom primjeru. Za te je slučajeve također provedeno modeliranje po oba modelska pristupa, a dobiveni rezultati prikazani su u tabličnim i grafičkim prikazima, i to za postaje Crkvine kamp (tablice 5.27-5.29, slike 5.39. i 5.40.), Kotarka ušće (tablice 5.30.-5.32., slike 5.41. i 5.42.) i te Prosika (tablice 5.33.-5.36., slike 5.43. i 5.44.).

Tablica 5.27. Prikaz osnovnih rezultata modeliranja sadržaja klorida u Vranskome jezeru na postaji Crkvine kamp ovisno o utjecajnim hidrološkim čimbenicima modelom regresijskoga stabla

Tip modela:		Regresijsko stablo – M5P	
<i>Ulazne varijable odabranog modela:</i>			
- Razine vode u jezeru – s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
- Ukupni površinski dotoci – s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
- Razine mora – s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
- Razlike razina vode u jezeru i moru - s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
- Temperature zraka - sa sukcesivnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
Analizirano razdoblje treniranja i validacije modela (1998.-2005.) i (2009.-2012.)			
Rezultati testiranja modela:			
Koeficijent korelacije: 0,939			
Srednja apsolutna pogreška: 302,02		Relativna apsolutna pogreška: 30,12 %	
Korijen iz srednje kvadratne pogreške: 462,31		Korijen iz relativne kvadratne pogreške: 39,87 %	
Usporedba osnovnih pokazatelja niza izmjerenih podataka i podataka dobivenog modelom:			
Sadržaj klorida (mgL^{-1})	Iz izmjerenih podataka:	Iz podataka proračunatih modelom:	
SR	1273	1471	
MAX	4100	4590	
MIN	301	272	

Slika 5.39.

Slika 5.39. Regresijsko stablo za ocjenu sadržaja klorida u Vranskome jezeru na postaji Crkvine kamp (simboli i jednadžbe s dane slike sadržani u tablici 5.27.)

Tablica 5.28. Prikaz regresijskih jednadžbi sadržanih u modelu regresijskoga stabla za ocjenu sadržaja klorida na postaji Crkvine kamp

Oznaka jednadžbe	Oblik jednadžbe – zavisna varijabla sadržaj klorida na postaji Crkvine kamp (mgL ⁻¹)		
Jed. 1	= - 87,4145 * 4 + 733,7798 * 7 - 976,697 * 8 - 240,101 * 11 - 584,2506 * 12 + 91,7524 * 27 - 43,8298 * 28 - 218,6831 * 30 - 824,2787 * 31 + 1532,2623 * 38 + 12570,961 * 39 - 297,0526 * 40 - 299,3798 * 43 + 311,2645		
Jed. 2	= - 62,7721 * 4 + 439,8703 * 7 - 976,697 * 8 - 240,101 * 11 - 660,4572 * 12 + 91,7524 * 27 - 43,8298 * 28 - 218,6831 * 30 - 1200,9775 * 31 + 1532,2623 * 38 + 12570,961 * 39 - 297,0526 * 40 - 299,3798 * 43 + 411,3367		
Jed. 3	= - 447,4061 * 4 + 1392,9915 * 7 - 1452,8552 * 8 - 240,101 * 11 + 148,5516 * 27 - 43,8298 * 28 - 218,6831 * 30 - 1334,5465 * 31 + 2480,8057 * 38 + 16776,8517 * 39 - 297,0526 * 40 - 484,7102 * 43 - 66,5667		
Jed. 4	= - 1318,6373 * 4 + 301,3622 * 6 - 30,5786 * 7 - 100,0088 * 8 - 432,7236 * 10 - 234,9663 * 11 + 11,9217 * 19 + 27,4117 * 24 - 21,1228 * 28 - 46,3552 * 30 + 2784,0144 * 39 - 753,6858 * 40 + 387,1147 * 43 + 341,2015 * 46 + 1108,0605		
Jed. 5	= - 103,9437 * 4 + 126,6595 * 6 + 1,1735 * 7 - 196,963 * 8 - 285,5273 * 10 - 195,2437 * 11 + 1,9188 * 16 + 5,0106 * 19 + 11,5208 * 24 - 7,4053 * 28 - 65,2627 * 30 - 116,6136 * 33 + 2784,0144 * 39 - 399,7566 * 40 + 162,7004 * 43 + 143,4035 * 46 + 714,654		
Jed. 6	= - 103,9437 * 4 + 126,6595 * 6 - 66,0885 * 7 - 128,5173 * 8 - 441,7014 * 10 - 165,833 * 11 + 1,7444 * 16 + 5,0106 * 19 + 11,5208 * 24 + 26,369 * 28 - 66,655 * 30 - 106,0123 * 33 + 2784,0144 * 39 - 399,7566 * 40 + 162,7004 * 43 + 143,4035 * 46 + 845,7641		
Jed. 7	= - 103,9437 * 4 + 126,6595 * 6 - 34,1634 * 7 - 128,5173 * 8 - 367,6183 * 10 - 165,833 * 11 + 1,7444 * 16 + 5,0106 * 19 + 11,5208 * 24 + 25,7011 * 28 - 66,655 * 30 - 106,0123 * 33 + 2784,0144 * 39 - 399,7566 * 40 + 162,7004 * 43 + 143,4035 * 46 + 715,6148		
Utjecajni čimbenici:			
4	Razlika razine jezera i mora u danu uzorkovanja (m)	27	Srednji ukupni površinski dotoci prethodnih 60 dana [#] (m ³ s ⁻¹)
6	Srednja razlika razine jezera i mora prethodnih 7 dana [#] (m)	28	Srednji ukupni površinski dotoci prethodnih 90 dana [#] (m ³ s ⁻¹)
7	Srednja razlika razine jezera i mora prethodnih 15 dana [#] (m)	30	Srednji ukupni površinski dotoci prethodnih 365 dana [#] (m ³ s ⁻¹)
8	Srednja razlika razine jezera i mora prethodnih 30 dana [#] (m)	31	Srednja razina mora u danu uzorkovanja (m n. m.)
10	Srednja razlika razine jezera i mora prethodnih 90 dana [#] (m)	33	Srednja razina mora prethodnih 7 dana [#] (m n. m.)
11	Srednja razlika razine jezera i mora prethodnih 150 dana [#] (m)	38	Srednja razina mora prethodnih 150 dana [#] (m n. m.)
12	Srednja razlika razine jezera i mora prethodnih 365 dana [#] (m)	39	Srednja razina mora prethodnih 365 dana [#] (m n. m.)
16	Srednja temperatura zraka prethodnih 15 dana [#] (°C)	40	Srednja razina jezera u danu uzorkovanja (m n. m.)
19	Srednja temperatura zraka prethodnih 90 dana [#] (°C)	43	Srednja razina jezera prethodnih 15 dana [#] (m n. m.)
24	Srednji ukupni površinski dotoci prethodnih 7 dana [#] (m ³ s ⁻¹)	46	Srednja razina jezera prethodnih 90 dana [#] (m n. m.)

Napomena: # srednje dnevne vrijednosti navedenih trajanja odnose se na razdoblja prethodnih, s postupnim pomacima određivanih intervala od 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150 i 365 dana.

Tablica 5.29. Prikaz osnovnih rezultata provedenih modeliranja sadržaja klorida na postaji Crkvine kamp na Vranskome jezeru u ovisnosti o utjecajnim hidrološkim čimbenicima modelom neuronske mreže

Tip modela:		Neuronska mreža – ML Perceptron	
<i>Ulazne varijable odabranog modela:</i>			
- Razine vode u jezeru – s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
- Ukupni površinski dotoci – s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
- Razine mora – s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
- Razlike razina vode u jezeru i moru - s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
- Temperature zraka - s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
Analizirano razdoblje treniranja i validacije modela (2000.-2005.) i (2009.-2012.)			
Parametri modela:			
Koeficijent brzine učenja: 0,1		Broj skrivenih slojeva: automatski određen	
Moment: 0,2		Broj epoha: 50	
Rezultati testiranja modela:			
Koeficijent korelacije: 0,9456			
Srednja apsolutna pogreška: 314,6		Relativna apsolutna pogreška: 31,38 %	
Korijen iz srednje kvadratne pogreške: 388,4		Korijen iz relativne kvadratne pogreške: 33,47 %	
Usporedba osnovnih pokazatelja niza izmjerenih podataka i podataka dobivenog modelom:			
Sadržaj klorida (mgL ⁻¹)	Iz izmjerenih podataka:	Iz podataka proračunatih modelom:	
SR	1273	1374	
MAX	4100	3844	
MIN	201	185	

Slika 5.40.

Slika 5.40. Usporedni prikaz izmjerenih i modelima regresijskoga stabla i neuronskih mreža proračunatih vrijednosti sadržaja klorida u Vranskome jezeru na mjernoj postaji Crkvine kamp ovisno o utjecajnim hidrološkim čimbenicima za testno razdoblje (2006.-2008.)

Iz prikaza (tablice 5.27-5.29, slike 5.39. i 5.40.) je vidljivo da su i bez razmatranja sadržaja klorida na susjednim postajama, analizom samo hidroloških utjecajnih čimbenika, provedenim modelskim sagledavanjima dobiveni vrlo prihvatljivi rezultati ocjene sadržaja klorida na postaji Crkvine kamp. Pritom je, zbog utvrđenih manjih odstupanja u odnosu na rezultate dobivene po modelu regresijskoga stabla, model neuronskih mreža ocijenjen kao prihvatljiviji jer se rezultati dobro uklapaju u izmjerene vrijednosti po čitavoj amplitudi sadržaja klorida tijekom testne godine (slika 5.40.). Model dobiven putem regresijskih stabala odlučivanja (slika 5.39.) pokazuje lošiju prilagodbu upravo u području visokih sadržaja klorida, ali ukazuje na hidrološke čimbenike koji najviše utječu na promjene sadržaja klorida na toj lokaciji - srednje razlike razine mora i jezera, kao i razine mora iz prethodnih, vremenski uglavnom jako udaljenih razdoblja koja sežu i iza prethodne godine dana. Time je potvrđena tromost jezerskog sustava u pogledu promjene sadržaja klorida, odnosno pokazano je da je potrebno jako dugo vrijeme da se jezerski sustav s povećanim sadržajem klorida vrati na uobičajena stanja sadržaja klorida.

Slična je analiza provedena i za Crkvinama susjednu postaju Kotarka ušće (tablice 5.30.-5.32., slike 5.41. i 5.42.).

Tablica 5.30. Prikaz osnovnih rezultata provedenih modeliranja sadržaja klorida u Vranskome jezeru na postaji Kotarka ušće ovisno o utjecajnim hidrološkim čimbenicima modelom regresijskoga stabla

Tip modela:		Regresijsko stablo – M5P	
<i>Ulazne varijable odabranog modela:</i>			
- Razine vode u jezeru – s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
- Ukupni površinski dotoci – s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
- Razine mora – s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
- Razlike razina vode u jezeru i moru - s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
- Temperature zraka - sa sukcesivnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
Analizirano razdoblje treniranja i validacije modela (1998.-2005.) i (2009.-2012.)			
Rezultati testiranja modela:			
Koeficijent korelacije: 0,8324			
Srednja apsolutna pogreška: 440,0		Relativna apsolutna pogreška: 44,96 %	
Korijen iz srednje kvadratne pogreške: 638,9		Korijen iz relativne kvadratne pogreške: 49,78 %	
Usporedba osnovnih pokazatelja niza izmjerenih podataka i podataka dobivenog modelom:			
Sadržaj klorida (mgL ⁻¹)	Iz izmjerenih podataka:	Iz podataka proračunatih modelom:	
SR	1273	1471	
MAX	4100	4590	
MIN	301	272	

Tablica 5.31. Prikaz osnovnih rezultata provedenih modeliranja sadržaja klorida na postaji Kotarka ušće na Vranskom jezeru modelom regresijskog stabla

Oznaka jednadžbe	Oblik jednadžbe – zavisna varijabla sadržaj klorida na postaji Kotarka ušće (mgL⁻¹)
Jed. 1	= 977,2748 * 4 - 1018,8429 * 5 - 985,0868 * 6 + 1295,9711 * 7 - 833,2661 * 8 + 550,1952 * 10 - 443,5238 * 11 - 26,5283 * 17 - 292,7835 * 24 + 351,4665 * 25 - 1460,4647 * 35 + 1603,5901 * 38 - 1583,849 * 40 - 417,2812 * 41 + 3.142,893
Jed. 2	= 977,2748 * 4 - 1018,8429 * 5 - 985,0868 * 6 + 1295,9711 * 7 - 833,2661 * 8 + 550,1952 * 10 - 443,5238 * 11 - 26,5283 * 17 - 292,7835 * 24 + 351,4665 * 25 - 1460,4647 * 35 + 1603,5901 * 38 - 1583,849 * 40 - 417,2812 * 41 + 3.141,1474

Jed. 3	= 977,2748 * 4 - 1018,8429 * 5 - 985,0868 * 6 + 1295,9711 * 7 - 833,2661 * 8 + 550,1952 * 10 - 459,4205 * 11 - 26,5283 * 17 - 292,7835 * 24 + 351,4665 * 25 - 1460,4647 * 35 + 1603,5901 * 38 - 1583,849 * 40 - 417,2812 * 41 + 3.132,4494
Jed. 4	= = 606,4666 * 4 - 782,4886 * 5 - 740,1652 * 6 + 1295,9711 * 7 - 833,2661 * 8 + 601,1048 * 10 - 283,3983 * 11 - 17,1361 * 17 - 292,7835 * 24 + 351,4665 * 25 - 1460,4647 * 35 + 1603,5901 * 38 - 1281,6878 * 40 - 417,2812 * 41 + 2.485,8904
Jed. 5	= 606,4666 * 4 - 782,4886 * 5 - 740,1652 * 6 + 1295,9711 * 7 - 833,2661 * 8 + 504,8692 * 10 - 283,3983 * 11 - 17,1361 * 17 - 292,7835 * 24 + 351,4665 * 25 - 1460,4647 * 35 + 1603,5901 * 38 - 1281,6878 * 40 - 417,2812 * 41 + 2.536,8795
Jed. 6	= -1108,015 * 4 - 262,5091 * 5 - 201,3376 * 6 + 1295,9711 * 7 - 489,5306 * 8 + 178,9716 * 10 - 129,3006 * 11 + 3,5268 * 17 - 292,7835 * 24 + 351,4665 * 25 + 12,5119 * 31 - 895,2054 * 35 + 1603,5901 * 38 - 1255,3811 * 39 - 616,9331 * 40 - 417,2812 * 41 + 1.998,1687
Jed. 7	= -1177,146 * 4 - 262,5091 * 5 - 201,3376 * 6 + 1295,9711 * 7 - 463,0895 * 8 + 178,9716 * 10 - 129,3006 * 11 + 3,5268 * 17 - 292,7835 * 24 + 351,4665 * 25 - 516,3222 * 31 - 851,7239 * 35 + 1603,5901 * 38 - 1351,9489 * 39 - 616,9331 * 40 - 417,2812 * 41 + 2.000,1296
Jed. 8	= -219,7771 * 4 + 200,3229 * 5 - 211,4044 * 6 + 405,3763 * 7 + 3,7032 * 17 - 1,4662 * 22 + 26,5852 * 24 + 33,6309 * 25 + 558,7845 * 37 + 695,6361 * 38 - 647,7797 * 40 + 373,5091
Jed. 9	= -219,7771 * 4 + 200,3229 * 5 - 211,4044 * 6 + 405,3763 * 7 + 3,7032 * 17 - 0,7331 * 22 + 26,5852 * 24 + 35,687 * 25 + 137,18 * 37 + 695,6361 * 38 - 647,7797 * 40 + 427,3779

Utjecajni čimbenici:

4	Razlika razine jezera i mora u danu uzorkovanja (m)	24	Srednji ukupni površinski dotoci prethodnih 7 dana (m^3s^{-1})
5	Srednja razlika razine jezera i mora prethodnih 3 dana* (m)	25	Srednji ukupni površinski dotoci prethodnih 15 dana (m^3s^{-1})
6	Srednja razlika razine jezera i mora prethodnih 7 dana* (m)	31	Srednja razina mora u danu uzorkovanja (m n. m.)
7	Srednja razlika razine jezera i mora prethodnih 15 dana* (m)	35	Srednja razina mora prethodnih 30dana* (m n. m.)
8	Srednja razlika razine jezera i mora prethodnih 30 dana* (m)	37	Srednja razina mora prethodnih 90 dana* (m n. m.)
10	Srednja razlika razine jezera i mora prethodnih 90 dana* (m)	38	Srednja razina mora prethodnih 150 dana* (m n. m.)
11	Srednja razlika razine jezera i mora prethodnih 150 dana* (m)	39	Srednja razina mora prethodnih 365 dana* (m n. m.)
17	Srednja temperatura zraka prethodnih 30 dana* ($^{\circ}C$)	40	Srednja razina jezera u danu uzorkovanja (m n. m.)
22	Ukupni površinski dotoci u danu uzorkovanja (m^3s^{-1})	41	Srednja razina jezera prethodnih 3 dana (m n. m.)

Napomena: # srednje dnevne vrijednosti navedenih trajanja odnose se na razdoblja prethodnih, s postupnim pomacima određivanih intervala od 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150 i 365 dana.

Slika 5.41.

Slika 5.41. Regresijsko stablo za ocjenu sadržaja klorida u Vranskome jezeru na postaji Kotarka ušće (simboli i jednadžbe s dane slike sadržani u tablici 5.31.)

Slika 5.42.

Slika 5.42. Usporedni prikaz izmjerenih i modelima regresijskoga stabla i neuronskih mreža proračunatih vrijednosti sadržaja klorida u Vranskome jezeru na mjernoj postaji Kotarka ušće ovisno o utjecajnim hidrološkim čimbenicima, za testno razdoblje (2006.-2008.)

Tablica 5.32. Prikaz osnovnih rezultata provedenih modeliranja sadržaja klorida na postaji Kotarka ušće u Vranskome jezeru ovisno o utjecajnim hidrološkim čimbenicima modelom neuronske mreže

Tip modela:		Neuronska mreža – ML Perceptron	
<i>Ulazne varijable odabranoga modela:</i>			
- Razine vode u jezeru – s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
- Ukupni površinski dotoci – s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
- Razine mora – s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
- Razlike razina vode u jezeru i moru - s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
- Temperature zraka - s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
Analizirano razdoblje treniranja i validacije modela (2000.-2005.) i (2009.-2012.)			
Parametri modela:			
Koefficient brzine učenja: 0,1		Broj skrivenih slojeva: automatski određen	
Moment: 0,2		Broj epoha: 3000	
Rezultati testiranja modela:			
Koefficient korelacije: 0,5016			
Srednja apsolutna pogreška: 847,98		Relativna apsolutna pogreška: 86,36 %	
Korijen iz srednje kvadratne pogreške: 1114,25		Korijen iz relativne kvadratne pogreške: 86,82 %	
Usporedba osnovnih pokazatelja niza izmjerenih podataka i podataka dobivenog modelom:			
Sadržaj klorida (mgL ⁻¹)	Iz izmjerenih podataka:	Iz podataka proračunatih modelom:	
SR	1496	1474	
MAX	4000	3757	
MIN	115	122	

Iz prikaza (tablice 5.30.-5.32., slike 5.41. i 5.42.) je vidljivo da su rezultati procjene sadržaja klorida na postaji Kotarka ušće puno lošiji nego li u prethodnom primjeru u kojem su se takve procjene provele za postaju Crkvine. Iz prikaza odnosa izmjerenih i korištenim modelima proračunatih vrijednosti sadržaja klorida tijekom testnoga razdoblja (2006.–2008.) (slika 5.42.) vidljivo je da su izmjerene varijacije sadržaja klorida u pojedinim terminima uzorkovanja (tijekom 2007. godine) uglavnom puno veće nego li su ih odabrani modeli mogli procijeniti. Pritom su rezultati dobiveni modelom neuronskih mreža lošiji od odabranog modela regresijskog stabla što je neuobičajeno. Razlog za spomenuta značajnije veća odstupanja između izmjerenih i obama modelima proračunatim vrijednostima je puno veći utjecaj dotoka kanalom Kotarka u jezero, a koji bitno utječe na sadržaj klorida na tom rubnom jezerskom prostoru. Zbog toga odabranim modelom generirano regresijsko stablo (slika 5.41.) pokazuje da su najutjecajnije čimbenici koji utječu na promjene sadržaja klorida na toj postaji uglavnom vezani za hidrološka stanja koja su relativno kratko vremenski pomaknuta u odnosu na termin uzorkovanja.

Koristeći se istima ulaznim podacima o hidrološkim prilikama, puno je veća razlika između rezultata odabranih modela regresijskih stabala i neuronskih mreža dobivena pri procjenama sadržaja klorida na postaji Prosika (tablice 5.33.-5.36., slike 5.43. i 5.55.). Pritom su rezultati dobiveni modelom neuronskih mreža puno prihvatljiviji zbog značajnije boljega prilagođavanja podacima o izmjerenim sadržajima klorida tijekom testnog razdoblja (2006.–2008.).

Tablica 5.33. Prikaz osnovnih rezultata provedenih modeliranja sadržaja klorida u Vranskome jezeru na postaji Prosika ovisno o utjecajnim hidrološkim čimbenicima modelom regresijskoga stabla

Tip modela:		Regresijsko stablo – M5P	
<i>Ulazne varijable odabranoga modela:</i>			
- Razine vode u jezeru – s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
- Ukupni površinski dotoci – s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
- Razine mora – s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
- Razlike razina vode u jezeru i moru - s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
- Temperature zraka - sa sukcesivnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
Analizirano razdoblje treniranja i validacije modela (1998.-2005.) i (2009.-2012.)			
Rezultati testiranja modela:			
Koeficijent korelacije: 0,8826			
Srednja apsolutna pogreška: 583,0		Relativna apsolutna pogreška: 41,68 %	
Korijen iz srednje kvadratne pogreške: 935,0		Korijen iz relativne kvadratne pogreške: 52,31 %	
Usporedba osnovnih pokazatelja niza izmjerenih podataka i podataka dobivenog modelom:			
Sadržaj klorida (mgL^{-1})	Iz izmjerenih podataka:	Iz podataka proračunatih modelom:	
SR	1765	1411	
MAX	6500	3844	
MIN	168	0	

Slika 5.43.

Slika 5.43. Regresijsko stablo za ocjenu sadržaja klorida u Vranskome jezeru na postaji Prosika (simboli i jednadžbe sa slike sadržani su u tablici 5.34.)

Tablica 5.34. Prikaz osnovnih rezultata provedenih modeliranja sadržaja klorida na postaji Prosika u Vranskom jezeru modelom regresijskoga stabla

Oznaka jednadžbe	Oblik jednadžbe – zavisna varijabla sadržaj klorida na postaji Prosika (mgL ⁻¹)			
Jed. 1	= - 1969,3487 * 8 + 1252,7924 * 9 - 357,7467 * 10 + 2903,7889 * 12 - 37,2322 * 20 - 1928,8026 * 30 - 2296,1178 * 37 + 44499,9436 * 39 - 765,0933 * 44 - 1223,6982 * 45 - 273,4 * 47 - 3.561,0274			
Jed. 2	= - 176,6989 * 4 + 323,1682 * 8 - 448,0668 * 9 - 228,8218 * 10 - 2436,1175 * 12 - 14,8083 * 20 - 178,2137 * 30 + 330,9646 * 33 - 913,2287 * 37 + 6969,1899 * 39 - 304,2985 * 44 + 94,658 * 45 - 205,3453 * 47 + 2.539,4508			
Jed. 3	= - 104,1568 * 4 + 323,1682 * 8 + 138,446 * 9 - 268,8087 * 10 - 398,4772 * 12 - 29,5261 * 20 + 77,3923 * 21 - 178,2137 * 30 + 136,0128 * 33 - 913,2287 * 37 + 7043,461 * 39 - 304,2985 * 44 - 64,2387 * 45 - 245,6837 * 47 - 65,4901			
Jed. 4	= - 153,0983 * 4 + 323,1682 * 8 - 61,9901 * 9 - 177,8484 * 10 - 769,0448 * 12 - 14,8083 * 20 - 178,2137 * 30 + 136,0128 * 33 - 913,2287 * 37 + 8985,7618 * 39 - 304,2985 * 44 - 120,2819 * 45 - 193,8464 * 47 + 1.026,1165			
Utjecajni čimbenici:				
4	Razlika razine jezera i mora u danu uzorkovanja (m)	30	Srednji ukupni površinski dotoci prethodnih 365 dana [#] (m ³ s ⁻¹)	
8	Srednja razlika razine jezera i mora prethodnih 30 dana [#] (m)	33	Srednja razina mora prethodnih 7 dana [#] (m n. m.)	
9	Srednja razlika razine jezera i mora prethodnih 60 dana [#] (m)	37	Srednja razina mora prethodnih 90 dana [#] (m n. m.)	
10	Srednja razlika razine jezera i mora prethodnih 90 dana [#] (m)	39	Srednja razina mora prethodnih 365 dana [#] (m n. m.)	
12	Srednja razlika razine jezera i mora prethodnih 365 dana [#] (m)	44	Srednja razina jezera prethodnih 30 dana [#] (m n. m.)	
20	Srednja temperatura zraka prethodnih 150 dana [#] (°C)	45	Srednja razina jezera prethodnih 60 dana [#] (m n. m.)	
21	Srednja temperatura zraka prethodnih 365 dana [#] (°C)	47	Srednja razina jezera prethodnih 150 dana [#] (m n. m.)	

Napomena: [#] srednje dnevne vrijednosti navedenih trajanja odnose se na razdoblja prethodnih, postupno pomaknutih intervala od 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150 i 365 dana.

Slika 5.44.

Slika 5.44. Usporedni prikaz izmjerenih i modelima regresijskoga stabla i neuronskih mreža proračunatih vrijednosti sadržaja klorida u Vranskome jezeru na mjernoj postaji Prosika ovisno o utjecajnim hidrološkim čimbenicima za testno razdoblje (2006.-2008.)

Tablica 5.35. Prikaz osnovnih rezultata provedenih modeliranja sadržaja klorida na postaji Prosika na Vranskome jezeru ovisno o utjecajnim hidrološkim čimbenicima modelom neuronske mreže

Tip modela:		Neuronska mreža – ML Perceptron	
<i>Ulazne varijable odabranoga modela:</i>			
- Razine vode u jezeru – s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
- Ukupni površinski dotoci – s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
- Razine mora – s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
- Razlike razina vode u jezeru i moru - s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
- Temperature zraka - s postupnim pomacima od 0, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 150, 365 prethodnih dana			
Analizirano razdoblje treniranja i validacije modela (2000.-2005.) i (2009.-2012.)			
Parametri modela:			
Koeficijent brzine učenja: 0,1		Broj skrivenih slojeva: automatski određen	
Moment: 0,2		Broj epoha: 50	
Rezultati testiranja modela:			
Koeficijent korelacije: 0,9638			
Srednja apsolutna pogreška: 374,06		Relativna apsolutna pogreška: 26,74 %	
Korijen iz srednje kvadratne pogreške: 481,0		Korijen iz relativne kvadratne pogreške: 26,92 %	
Usporedba osnovnih pokazatelja niza izmjerenih podataka i podataka dobivenog modelom:			
Sadržaj klorida (mgL ⁻¹)	Iz izmjerenih podataka:	Iz podataka proračunatih modelom:	
SR	1765	1711	
MAX	6500	5415	
MIN	168	73	

Znatno bolji rezultati modeliranja sadržaja klorida u Vranskom jezeru na postaji Prosika rezultat su ujednačenijega djelovanja mora na jezerski sustav te utjecaja mase jezerske vode na postupnost odvijanja promjena sadržaja klorida. Naime, za razliku od donosa zaslanjenja kanalom Kotarke ili pak utjecaja njezinih protoka na odslađivanje jezera na dijelu jezera na kojem se provode uzorkovanja,

Vransko jezero u dijelu gdje je i postaja Prosika zbog svoje otvorenosti ima bolju izmjenu vodnih masa. Rezultati modeliranja odabranim modelom regresijskoga stabla pokazuju podjednaku zavisnost sadržaja klorida o relativno bliskim i dalekim hidrološkim stanjima razine vode u jezeru i moru.

Kao opći zaključak primjene modela strojnog učenja za procjenu sadržaja klorida u Vranskome jezeru na različitim lokacijama uzorkovanja moglo bi se istaknuti to da je tim modelima moguće provoditi primjerena predviđanja uzimajući u obzir utjecajne hidrološke čimbenike. U većini slučajeva bolje su rezultate, posebno tijekom kritično sušnih razdoblja, davali modeli neuronskih mreža jer su se lakše prilagođavali relativno kratkom nizu izmjerenih vrijednosti koji se koristio za treniranje modela. No, i modeli regresijskih stabala odlučivanja dokazali su opravdanost njihove primjene, posebno u svrhu ocjene utjecaja najizraženijih čimbenika na promjene sadržaja klorida. Utvrđeno je i da izbor mjernoga mjesta utječe na rezultate modeliranja – bolji rezultati postizani su na postajama kod kojih je više izražena tromost jezerskog sustava.

5.6.3. Modeliranje kolebanja razine vode u jezeru u promijenjenim scenarijima klimatskih prilika

Kao što je prikazano u poglavlju 5.1., osim modeliranja stvarnoga stanja u jezeru, korištenim modelima moguće je provoditi unutargodišnja - sezonska predviđanja. Moguće je prognozirati i promjene na duljoj vremenskoj skali – prema različitim scenarijima klimatskih promjena/varijacija. Pritom je korišten model neuronskih mreža opisan pri procjenama predviđanja stanja u jezeru za tri mjeseca unaprijed iz poglavlja 5.1. te različiti klimatski scenariji i procjene njihovih posljedica (tablica 5.21.).

Rezultati modelskih prognoza uspoređeni su s rezultatima modelske prognoze stanja u neizmijenjenim uvjetima (slika 5.45.). Pri ocjeni rezultata i diskusiji o njima odabrana je usporedba s rezultatima modela za slučaj neizmijenjenih klimatskih prilika, a ne izmjerenoga stanja, i to zato da se uspoređuju istovrsni rezultati kako iskazane razlike (relativno male i prihvatljive) između modelske prognoze i stvarnoga stanja u neizmijenjenim uvjetima ne bi utjecale na zaključke.

Slika 5.45.

Slika 5.45. Usporedni prikaz izmjerenih i modelom neuronskih mreža proračunatih vrijednosti srednjih dnevnih razina vode u Vranskom jezeru s vremenskim pomakom od tri mjeseca za testno razdoblje (2006.-2008.)

Prema scenarijima 1 i 2 koji se odnose na promjene prosječnih klimatskih prilika tijekom razdoblja od 2021. do 2050. po modelima RegCM3 i Aladin, na primjeru testnih godina iz razdoblja od 2006. do 2008. vidi se da bi se maksimalne razine najviše smanjile, i to 16 cm kod prognoza zasnovanih na modelu RegCM3 i 27 cm kod prognoza zasnovanih na modelu Aladin. Prognozira se da bi srednje razine vode pale za 5, odnosno 6 cm, a slično tome i minimalne – za 6, odnosno 9 cm. Za kraj 21. stoljeća prognozirane su još značajnije promjene temperatura zraka i hidroloških prilika, što bi moglo rezultirati još naglašenijim promjenama razina vode u Vranskome jezeru s dosegnutim minimumima od -0,13 m n. m., odnosno od -0,14 m n. m., tj. promjenama od 17-18 cm u odnosu na stanje iz 2008. Ta 2008. godina bila je daleko manje kritična nego li 2012., ali bi se u slučaju ostvarenja modelskih prognoza po dosegnutim minimalnim razinama vode predviđeno stanje izjednačilo sa stanjem iz

2012. Razumljivo je da bi, u slučaju modeliranja stanja 2012. u još kritičnijim hidrološkim prilikama smanjenih dotoka i većih temperatura, stanje bilo još opasnije. No, takve hidrološke prilike nisu modelirane zato što neuronskim mrežama nije moguće primjereno ekstrapolirati stanja na kojima mreža nije trenirana.

Uz rezultate modeliranja kolebanja razine vode u jezeru u izmijenjenim klimatskim prilikama, svakako bi bilo zanimljivo sagledati i procjene promjene sadržaja klorida koji prate takve promjene. Provedena modeliranja modelima strojnoga učenja u tome smislu nisu dala prihvatljive rezultate zbog vrlo malog broja do sada zabilježenih slučajeva vrlo visokih sadržaja klorida u jezerskoj vodi.

Dobiveni rezultati modeliranja sezonskih kolebanja razine jezera izloženi u ovome poglavlju početna su pretpostavka za korištenje odabranoga modela u globalne prognostičke svrhe za dulje razdoblje – za prognozu razina vode u jezeru u okolnosti promijenjenih hidroloških prilika.

6. ZAKLJUČCI

Predmet istraživanja ovoga doktorskog rada je hidrologija priobalnih krških jezera s posebnim naglaskom na analizi utjecaja klimatskih prilika na njihov vodni režim i stabilnost, kako tijekom prošlih razdoblja, tako i u smislu mogućih utjecaja očekivanih klimatskih promjena/varijacija u budućnosti. Razvoj suvremenih pristupa upravljanja vodnim resursima pretpostavlja napuštanje dosadašnjih pretpostavki da se vodne sustave i krške vodonosnike promatra i opisuje uglavnom statički sa značajkama koje imaju u sadašnjosti. Zaštita posebno vrijednih vodnih resursa traži razumijevanje njihova djelovanja i predviđanja njihova ponašanja u izmijenjenim rubnim uvjetima te ih je stoga nužno analizirati kao dinamičke sustave u svakidašnjim okolnostima, ali i u neprekidnosti razvoja klimatskih i hidroloških procesa, što je i provedeno u ovome doktorskome radu.

Područje na kome su provedena istraživanja je Vransko jezero kod Biograda n/m, odnosno Vransko jezero u Dalmaciji. To je složen i vrlo osjetljiv dinamički sustav priobalnoga jezera – kriptodepresija, njegov krški vodonosnik i more. Zbog svojih je iznimnih prirodnih vrijednosti jezero i područje uz njega zaštićeno kao park prirode, a uvršteno je i na popis Ramsarske konvencije svjetski važnih močvara. Njegova je osjetljivost na promjene posebno naglašena tijekom sušnih razdoblja koja se sve učestalije javljaju i praćena su sve intenzivnijim zaslanjenjima jezerskoga sustava. To je bilo posebno izraženo 2008. i 2012. godine kada je zbog iznimnoga zaslanjenja bila ugrožena opstojnost jezera kao slatkovodnoga, odnosno boćatoga priobalnog vodnog sustava.

Ciljevi ovoga doktorskog rada bili su usmjereni u dva pravca: s jedne strane na izradu konceptualnoga modela djelovanja priobalnoga krškog vodonosnika vezanoga

uz slatkovodni jezerski sustav te u tom smislu detaljnije proučavanje vodnoga režima Vranskoga jezera u Dalmaciji. To se odnosi prije svega na proučavanje mehanizma njegova prihranjivanja i međuodnosa s morem i problemom zaslanjivanja njegovih voda, utvrđivanje hidroloških promjena koje se u tome vodnom režimu očituju u duljem vremenskom razdoblju, kao i procjena mogućih promjena vodnoga režima vezanih uz moguće promijenjene klimatske utjecaje i u budućnosti. S druge strane cilj rada bio je i da se na primjeru Vranskoga jezera razviju i unaprijede kako konceptualni pristupi u promišljanjima djelovanja vodnih sustava u priobalnome kršu, tako i postupci hidroloških analiza i modeliranja vodnoga režima priobalnih jezera u kršu koji se mogu poopćiti te primjenjivati i na drugim sličnim područjima.

Metodologija korištena za obradu podataka kako bi se postigli postavljeni ciljevi u ovome je doktorskom radu prilagođena tipologiji razmatranih problema, počevši od osnovnih pa do modelskih. Osnovnim metodološkim pristupima (metodama statističke deskripcije, statističkih analiza vremenskih serija, empirijskim metodama te metodama analize i sinteze podataka vezanih uz pojedine hidrološke procese i događaje) istraživane su međusobne zakonitosti pojavnosti pojedinih parametara s analiziranoga prostora. Modelska istraživanja uključivala su definiranje konceptualnoga modela djelovanja jezerskoga sustava, kao i modela dotoka u jezerski sustav, a primijenjena su i simulacijska modeliranja hidroloških procesa vezanih uz prostor Vranskoga jezera, kao i širega regionalnog prostora.

U početnim dijelovima istraživanja naglašen je bio induktivni pristup – utvrđivanje uzročno-posljedičnih odnosa između analiziranih pojava. U završnim je, pak, fazama korišten deduktivni pristup – utvrđivanje zakonitosti tih veza i provedba modelskih predviđanja ponašanja jezerskoga sustava u drugačijim klimatskim prilikama. S obzirom na složenost takvih veza između oborina, otjecanja i dinamike

promjene stanja u jezerskome sustavu, pri modeliranjima je korištena višeslojna neuronska mreža s povratnim rasprostiranjem pogreške. Kako bi se i u izrazito nelinearnim sustavima kakvi su krški vodni sustavi uspostavile funkcionalne veze između utjecajnih karakterističnih parametara, primijenjeni su i napredni modelski alati za generiranje regresijskih stabala odlučivanja.

Rezultati provedenih analiza vezani su uz nekoliko razina sagledavanja – kako globalnih tako i pojedinačnih - neposredno vezanih uz razmatrani sustav Vranskoga jezera. Utvrđeno je da se globalni procesi u priobalju koji karakteriziraju vodne pojave na prostoru čitavoga Mediterana naglašeno osjećaju upravo na prostoru Vranskoga jezera i njegova krškoga vodonosnika.

Analize osnovnih hidroloških pokazatelja u slivu Vranskoga jezera pokazale su da postoje istaknuti trendovi smanjenja godišnjih količina oborina i dotoka u jezerski sustav, ali i porasta srednje godišnje temperature zraka, razine mora, pa čak i porasta razine vode u jezeru, što je posljedica povezanosti jezerskoga sustava i mora.

Tako je analizama klimatoloških značajki utvrđeno prisustvo globalnoga trenda porasta temperatura zraka koji na utjecajnom području iznosi oko $0,03\text{ }^{\circ}\text{C/god.}$, odnosno čak oko $2,9\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ god.}$ uz istovremeni pad godišnjih količina oborina od $2,0$ do $5,9\text{ mm/god.}$, ovisno o lokaciji na analiziranom regionalnom prostoru. Tako je prisustvo globalnih trendova povećanja srednje razine mora potvrđeno i na priobalnome području Vranskoga jezera, gdje je iskazano s rastućim trendom od $5,8\text{ mm/god.}$ Sve to utječe na količine dotoka vode u jezero, njegovu razinu, ali i na kakvoću vode u jezeru, odnosno povećanje udjela zaslanjene morske vode u jezeru. Pritom srednja godišnja razina vode u jezeru nema trend opadanja, već ovisno o razdoblju promatranja, stagnaciju ili pak, blaži porast. Razlog tome je mehanizam prihranjivanja Vranskoga jezera koji u uvjetima nižih razina vode u jezeru u odnosu

na more prihranjuje jezero podzemnim vodama s velikim količinama zaslanjene morske vode.

Utvrđeno je da razina vode Vranskoga jezera brzo reagira na promjene hidroloških prilika. Utjecaj ranijih hidroloških prilika značajno se osjeća svega oko tri mjeseca, tako da stanje iz prethodnih godina ne utječe na stanje u godini koja joj slijedi. Nasuprot tome, sadržaj klorida u jezerskome sustavu pokazuje međuovisnost stanja tijekom šesnaest mjeseci. Zbog velikoga prostornog položaja i volumena jezera, sadržaj klorida u vodi jezera tijekom vremena snažno varira ovisno o prostornom položaju mjesta uzorkovanja. Tako je tijekom kritično sušne 2012. godine na jugoistočnome dijelu jezera gdje se nalazi postaja Prosika, sadržaj klorida poprimio šesterostruku vrijednost u odnosu na ranije utvrđeni prosjek te je iznosio čak blizu 6600 mgL^{-1} , a čemu odgovara salinitet od iznimno visokih 19,8 %.

Ocjene globalne vodne bilance rezultirale su procjenom prosječnih ukupnih dotoka u jezerski sustav od $4,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, od čega oko $2,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ čine dotoci s većim dijelom hidrološki kontroliranih pritoka u Vranskom polju, a putem ostalih nekontroliranih površinskih i podzemnih dotoka od oko $1,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Najveće gubitke čine isparavanja sa slobodne vodne površine i istjecanje kanalom Prosika u podjednakim iznosima od oko $1,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, dok gubici na poniranje iznose oko $0,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Provedena je i procjena mogućega utjecaja promjena ili još naglašenijih varijacija klimatskih prilika na bilancu dotoka u jezero do 2100. godine. Rezultati obrada temeljeni na klimatološkim procjenama po modelu Aladin dali su nepovoljnije prognoziranje vrijednosti srednjih godišnjih protoka u usporedbi s rezultatima dobivenim korištenjem modela RegCM3. Ocijenjeno je da bi se, u slučaju ostvarivanja prognoziranih klimatskih scenarija, od 2021. do 2050. srednji godišnji protoci mogli smanjiti, ovisno o korištenom klimatskom modelu, za 8-14 %, a pred

kraj stoljeća to bi smanjenje moglo biti i naglašenije – čak i do 25-48 %. Još su moguće naglašenije promjene kod ekstremno malih godišnjih protoka, koji bi se do kraja 21. stoljeća mogli smanjiti za 30-60 % u odnosu na referentno 30-godišnje razdoblje od 1961. do 1990.

Rezultati modeliranja kolebanja razine vode u jezeru pokazali su da primjena modela strojnog učenja pridonosi boljem razumijevanju djelovanja sustava Vranskoga jezera te omogućava procjenu ponašanja Vranskoga jezera u izmijenjenim klimatskim prilikama. Pritom su se modeli iz domene neuronskih mreža pokazali prihvatljivijima u odnosu na modele regresijskih stabala odlučivanja s obzirom na odstupanja njima proračunatih vrijednosti od izmjerenih vrijednosti.

Rezultati modeliranja promjene kakvoće vode u jezeru, odnosno sadržaja klorida u jezerskoj vodi pokazali su da je njima moguće modeliranje stanja jezerskoga sustava, no pokazali su i svoja ograničenja u pogledu mogućnosti procjene ponašanja jezerskoga sustava u bitno izmijenjenim klimatskim prilikama. To je u puno većoj mjeri vezano uz problem monitoringa nego li je to posljedica programskih ograničenja zato što je osnovni problem bio osigurati veći broj podataka s vrlo visokim izmjerenim sadržajem klorida za treniranje modela.

Hidrološke značajke Vranskoga jezera sagledavane su i u regionalnim okvirima prema kojima je utvrđeno da se radi o hidrološki vrlo osjetljivome sustavu s brzim pražnjenjem rezervi podzemnih voda i velikim utjecajem mora na stanje u jezeru.

Osim iskazanih rezultata koji se neposredno odnose na nove spoznaje o Vranskome jezeru, načinu njegova djelovanja i međuvezama s krškim vodonosnikom i morem, o vodnoj bilanci i s njom povezanim klimatskim utjecajima, jednako važan rezultat istraživanja je i unapređenje metodologije rješavanja tih problema u krškim

sredinama. To je i najznačajniji izvorni znanstveni doprinos ovoga doktorskog rada. U njemu razvijeni pristup omogućava jednostavnu analizu složenih procesa koji su vezani uz to područje istraživanja, počevši od konceptualnoga modela pa do kvantifikacije određenih hidroloških pokazatelja. Razvijeni model prognoze utjecaja klimatskih promjena na bilancu dotoka vode u nekome slivu omogućava sagledavanje utjecaja mogućih scenarija klimatskih promjena na vodne resurse. Rezultati provedenih obrada pokazali su da primjena modela strojnoga učenja omogućava kako otkrivanje veza i u tako složenim sustavima kao što su vodni sustavi u kršu, tako i simulaciju ponašanja takvih sustava u promijenjenim uvjetima s prognozama stanja sustava putem karakterističnih hidroloških pokazatelja – razine vode, količine zaslanjivanja i slično.

Primjena rezultata istraživanja sadržanih u ovome doktorskome radu očekuje se na području hidrologije krških područja te u unapređenju metoda upravljanja i zaštite vodnih resursa na krškome priobalnom području. S obzirom na značajke ovoga doktorskog rada, to se odnosi prije svega na Vransko jezero kod Biograda n/m i uz njega vezan utjecajni prostor, ali i na vodne resurse sa sličnim problemima na drugim krškim priobalnim područjima. Metodološki postupci koji su razvijeni u okviru ovoga doktorskog rada pomoći će boljem sagledavanju i razumijevanju načina djelovanja priobalnih vodnih resursa u krškim vodonosnicima. Tako će se osigurati njihova učinkovitija zaštita od prekomjernoga zaslanjivanja uslijed promjena utjecajnih uvjeta.

S obzirom na stvarno stanje u sustavu Vranskoga jezera – s jedne strane pojave ekstremnih suša s pojavom kritično visokih vrijednosti pokazatelja zaslanjivanja jezerskoga sustava koji su zabilježeni posljednjih godina, a naročito 2012. godine - te planova za proširenje stupnja navodnjavanja na području Vranskoga

polja zahvaćanjem voda iz njegova sliva s druge strane, prva primjena dobivenih rezultata odnosi se na planiranje stvarnih zahvata i upravljačkih mjera na tome području. To se odnosi na planiranje izgradnje zapornice na odvodnome kanalu iz jezera za djelomičnu regulaciju istjecanja vode iz jezera, kao i pri planiranju upravljačkih mjera zaštita ekosustava Vranskoga jezera od prekomjernoga zaslanjivanja (operativni planovi upravljanja zapornicom razinama vode u Vranskome jezeru te korištenja voda za navodnjavanje u slivu Vranskoga jezera).

Preporuke za daljnji razvoj započelih istraživanja na prostoru Vranskoga jezera odnose se na unapređivanje sustava monitoringa te na pojedina područja istraživanja za koja su neophodni upravo takvi dodatni podaci koji se dosadašnjim monitoringom nisu mogli osigurati. Monitoring treba unaprijediti tako da se u okviru redovitoga programa monitoringa osiguraju nedostajajući klimatološki podaci (prije svega isparavanja sa slobodne vodene površine), poveća pouzdanost hidrološkoga monitoringa u mreži DHMZ-a (uređenjem dionica korita na kojima su hidrološke postaje kako bi se osigurala čvršća veza između razina vode i protoka te tako i pouzdanije konsumpcijske krivulje), uspostavi sustav praćenja dinamike kolebanja razina i kakvoće podzemnih voda (elektroprovodljivost) te tako da se sustav monitoringa kakvoće vode u jezeru dopuni učestalijim, pa i neprekinutim praćenjima odabranih parametara kakvoće (elektroprovodljivost, sadržaj klorida, temperatura vode). Posebnu pozornost nužno je posvetiti praćenjima komunikacije vode Vranskoga jezera i mora na mjestima priobalnih izvora i vrulja u jezeru i moru. Pritom je za iznalaženje mjesta njihova izviranja, klasične metode hidroloških mjerenja i uzorkovanja nužno nadopuniti s metodama daljinskih istraživanja, koristeći infracrvene satelitske ili avio snimke. Isto tako, hidrološka istraživanja koja su bila osnova u ovom doktorskom radu nužno je ubuduće čvršće povezati i s programima

geokemijskih istraživanja i istraživanja kakvoće vode, njezinoga izotopnog sastava te bioloških stanja u jezeru.

Preporuke u pogledu razvoja metoda istraživanja idu za tim da se, uz uključenje u buduće analize već i u ovom doktorskome radu razvijenih hidroloških modela i dodatnih podataka koje bi se unaprijeđenim sustavom monitoringa moglo osigurati, razvijaju i složeniji modeli koji uz hidrološke i odabrane kemijske, uključuju i biološke pokazatelje. Takvo modeliranje ekoloških procesa i pojava može simulirati promjene u ovako osjetljivim ekosustavima, što je nužno kako bi se zaštitilo Vransko jezero kao svjetski važan prirodni priobalni vodeni sustav te kako bi se tako na vrijeme predvidjele i provele primjerene upravljačke mjere vezane uz gospodarenje vodom jezera i njegovim slivom.

7. LITERATURA

7.1. Objavljeni radovi

- [1] Abrahart, R.; Kneale, P.E.; See, L.M., 2004. *Neural networks for hydrological modeling*. Leiden: A. A. Balkema Publishers.
 - [2] Antonioli, F.; Silenzi, S., 2007. *Variazioni relative del livello del mare e vulnerabilità delle pianure costiere italiane, Quaderni della Societa geologica Italiana*, 2, str. 1-29.
 - [3] Atkinson, T.C., 1986. Soluble rock terrains. U: Fookes, P.G.; Vaughn, P.R., *A Handbook of Engineering Geomorphology*. Survey University Press, str. 241-257.
 - [4] Bakalowicz, M., 2001. Exploration techniques for karst groundwater resources. U: *Procc. 6th International symposium and Field Seminar: Present state and future trends of karst studies*. Marmaris, Turkey, 2001, UNESCO.
 - [5] Bakalowicz, M., 2004. The epikarst, the skin of karst. U: Jones, W.K.; Culver D.C.; Herman J.S., ur., *Proceedings of the symposium, October 1-4, 2003*. Shepherdstown, West Virginia: Karst Waters Institute, str. 16-22.
 - [6] Bakalowicz, M., 2005. Karst groundwater: a challenge for new resoures. *Hydrogeology journal*, 3(1), str. 148-60.
 - [7] Bear, J.; Verruijt, A., 1994. *Modeling groundwater flow and pollution*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company.
 - [8] Beklioglu, M.; Romo, S.; Kagalou, I.; Quintana, X., 2007. State of the art in the functioning of shallow Mediterranean lakes: workshop conclusions. *Hydrobiologia*, 584(1), str. 317-326.
-

-
- [9] Benac, Č., Juračić, M., 1998. Geomorphological indicators of the sea level changes during Upper Pleistocene (Würm) and Holocene in the Kvarner region (NE Adriatic Sea). *Acta Geographica Croatica*, 33, str. 27–45.
- [10] Benac, Č.; Juračić, M.; Bakran-Petricioli, T., 2004. Submerged tidal notches in the Rijeka Bay NE Adriatic Sea: indicators of relative sea-level change and of recent tectonic movements. *Marine Geology*, 212(1-4), str. 21-33.
- [11] Benac, Č., Juračić, M., Blašković, I., 2008. Tidal notches in Vinodol Channel and Bakar Bay, NE Adriatic Sea: Indicators of recent tectonics. *Marine Geology*, 248 (3-4), str. 151-160.
- [12] Beraković, M., 1983. Proučavanje režima voda Vranskog jezera. U: *Jugoslavenski simpozij o inženjerskoj hidrologiji*. Zagreb: Građevinski institut, str. 272- 284.
- [13] Beven, K., 2003. *Rainfall-runoff modeling – the primer*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- [14] Bishop, C. M., 1995. *Neural networks for pattern recognition*. Oxford: Clarendon Press; New York: Oxford University Press.
- [15] Bolle, H.-J., 2003. *Mediterranean Climate: Variability and Trends*. Berlin: Springer.
- [16] Bonacci, O., 1987. *Karst hydrology*. Berlin: Springer – Verlag.
- [17] Bonacci, O., 2000. Određivanje mjesečnih i godišnjih koeficijenata otjecanja na primjeru sliva krškog izvora Gradole. *Hrvatske vode*, 8(32), str. 205-223.
- [18] Bonacci, O., 2001. Monthly and annual affective infiltration coefficients in Dinaric karst: example of Gradole karst spring catchment. *Hydrological sciences*, 46(2), str. 287-299.
-

-
- [19] Bonacci, O., 2010. Analiza nizova srednjih godišnjih temperatura zraka u Hrvatskoj. *Građevinar*, 62(9), str. 781-791.
- [20] Bonacci, O., 2011. Recent surface air temperature change in the Western Balkans. U: Balint, G.; Domokos, M., ur. U: *XXVth Conference of the Danubian countries on the hydrological forecasting and hydrological bases of water management*. Budapest: UNESCO IHP.
- [21] Bonacci, O.; Gereš, D., 2001. Impact Assessment and Adaptation to Climate Change: Hydrology and Water Resources. U: Jelavić, V., ur., *The First National Communication of the Republic of Croatia to the UN Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)*. Zagreb: Ministry of Environmental Protection and Physical Planning, str. 175-189.
- [22] Bonacci, O.; Roje-Bonacci, T., 2004. Posebnosti krških vodonosnika. U: *Građevni godišnjak*, 3/4. Zagreb: Hrvatski savez građevinskih inženjera, str. 90-187.
- [23] Bonacci, O.; Rubinić, J., 2009. Water losses from a reservoir built in karst: the example of the Boljunčica reservoir (Istria, Croatia). *Environmental geology*, 58(2), str. 339-145.
- [24] Bradley, R.S.; Jones, P.D., 1995. *Climate Since A.D. 1500*. London: Routledge.
- [25] Breznik, M., 1973. Nastanak zaslanjenih kraških izvirov in njihova sanacija. *Geologija - Rasprave in poročila*, 16, str. 183-186.
- [26] Breznik, M., 1998. *Storage reservoirs and deep wells in karst regions*. Rotterdam/Brookfield: Balkema.
- [27] Bubnova, R.; Hello, G.; Benard, P.; Geleyn, J., 1995. Integration of the Fully Elastic Equations Cast in the Hydrostatic Pressure Terrain - Following
-

-
- Coordinate in the Framework of the ARPEGE/ Aladin NWP System. *Monthly Weather Review*, 123, str. 515-35.
- [28] Capodaglio, A.G.; Jones, H.V.; Novotny, V.; Feng, X., 1991. Sludge Bulking analysis and forecasting: Application of system identification and artificial neural computing technology. *Water Research*, 25(10), str. 1217-1224.
- [29] Castro, M., Fernandez, C.; Gaertner, M.A., 1993. Description of a mesoscale atmospheric numerical model. *Mathematics, Climate, and Environment, Rech. Math. Appl. Ser.*, 27, str. 230-153.
- [30] Chapman, P.; Clinton, J.; Kerber, R., Khabaza, T.; Reinartz, T.; Shearer, C.; Wirth, R., 2000. CRISP-DM 1.0 - Step-by-step data mining guide. Dostupno na: <http://www.crisp-dm.org/CRISPWP-0800.pdf> (12.12.2008.)
- [31] Church, J.A.; White, N.J., 2006. A 20th century acceleration in global sea-level rise, *Geophys. Res. Lett.*, 33/. *Geophysical Research Letters*, 33.
- [32] Coops, H., Beklioglu, M.; Crisman, T.L., 2003. The role of water-level fluctuations in shallow lake ecosystems – workshop conclusions. *Hydrobiologia*, 506-509(1-3), str. 23-27.
- [33] Coppola, E.; Poulton, M.; Charles, E.; Dustman, J.; Szidarovszky, F., 2003. Application of artificial neural networks to complex groundwater management problems. *Natural resources research*, 12(4), str. 303-20.
- [34] Correggiari, A.; Roveri, M.; Trincardi, F., 1996. Late Pleistocene and Holocene evolution of the north Adriatic sea. *Il Quaternario Italian Journal of Quaternary Sciences*, 9(2), str. 697-704.
- [35] Council Directive 98/83/EC of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption. Dostupno na: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:31998L0083> (17.7.2014.)
-

-
- [36] CRISP-DM. Dostupno na: <http://www.crisp-dm.org/CRISPWP-0800.pdf> (26.2.2014.).
- [37] Crochet, P.; Marsaud, B., 1997. Approches conceptuelles de l'aquifère karstique. Problèmes méthodologiques et d'exploitation. *Hydrogéologie*, 3(3), str. 3-18.
- [38] Cudennec, C.; Leduc, C.; Koutsoyiannis, D., 2007. Dryland hydrology in Mediterranean regions—a review. *Hydrological Sciences Journal*, 52(6), str. 1077-1087.
- [39] Čupić, S. et al., 2011. Klimatske promjene, porast razine mora na hrvatskoj obali Jadrana? U: *Hrvatske vode pred izazovom klimatskih promjena*. Zagreb: Hrvatske vode.
- [40] Custodio, E., 2002. Aquifer Overexploitation: What Does It Mean? *Hydrogeology Journal*, 10(2), str. 254-277.
- [41] Custodio, E.; Bruggeman, G., 1982. Groundwater Problems in Coastal Areas. *Studies and Reports in Hydrology*, 45. UNESCO. Paris: UNESCO.
- [42] Dandy, G.C.; Maier H.R., 1993. Use of artificial neural networks for forecasting water quality. Preprints. U: *Stochastic and Statistical Methods in Hydrology and Environmental Engineering: An International Conference in Honour of Professor T.E. Unny*, University of Waterloo, Ontario, Canada, June 21-25, str. 509-511.
- [43] Deduš, B., 1994. Neuralni model upravljanja kanalskim sustavima. U: Makvić, Ž.; Vančina, F., ur., *Zbornik radova: Drugi stručni skup Sekcije za vodoopskrbu i odvodnju, Umag, 2. i 3. lipnja 1994*. Zagreb: Hrvatsko društvo za zaštitu voda i mora, str. 149-161.
-

-
- [44] Deybrodt, W.; Gabrovšek, F., 2002. Basic Process and Mechanisms governing the Evolution of Karst. U: Gabrovšek, F., ur., *Evolution of Karst: From Prekarst to Cessation*. Carsologica, Ljubljana-Postojna, str. 115–154.
- [45] De Wrachien, D., 2004. Climate change and irrigation requirements in the Mediterranean environment. U: Kosutic, S., ur., *Proceedings of the 32nd International Symposium on Agricultural Engineering Actual Tasks on Agricultural Engineering*. Zagreb, 2004.
- [46] Dingman, L.S., 1994. *Physical hydrology*. New York: Macmillan Pub. Co.; Toronto: Maxwell Macmillan Canada; New York: Maxwell Macmillan International, 1994.
- [47] Douglas, B.; Peltier, W.R., 2002. *The Puzzle of Global Sea Level Rise*. *Physics Today*, 55(3), str. 35-40.
- [48] Dukić, D., 1984. *Hidrologija kopna*. Beograd: Naučna knjiga.
- [49] Dvornik, J., 2003. Numeričke, heurističke i simboličke metode. *Građevinar*, 55(10), str. 575-582.
- [50] Esper, J.; Cook, E.; Schweingruber, F., 2002. Low-Frequency Signals in Long Tree-Ring Chronologies for Reconstructing Past Temperature Variability. *Science*, 295(5563), str. 2250-2253.
- [51] Fairbanks, R., 1989. A 17,000-year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation. *Nature*, 342, str. 637-642.
- [52] Faivre, S.; Fouache, E.; Prelogović, E., 2006. Relativna promjena morske razine duž Hrvatske obale u posljednjih 2000 godina u korelaciji s recentnim tektonskim pokretima. U: Arko-Pijevac, M.; Kružić, B. Marcelo, K., ur.,
-

Prirodoslovna istraživanja riječkog područja, knjiga sažetaka. Rijeka:

Prirodoslovni muzej Rijeka.

- [53] Fleury, P.; Bakalowicz, M.; de Marsily, G., 2007. Submarine springs and coastal karst aquifers: a review. *Journal of Hydrology*, 339(1–2), str. 79–92.
- [54] Florido, E., Florido, E.; Auriemma, R.; Faivre, S.; Rossic, I.R.; Antoniolid, F.; Furlanie, S.; Spadaf, G., 2011. Istrian and Dalmatian fishtanks as sea-level markers. *Quaternary International*, 232(1-2), str. 105-113.
- [55] Ford, D.C.; Williams, P., 1989. *Karst Geomorphology and Hydrology*. Winchester, Massachusetts: Unwin Hyman.
- [56] Ford, D.C.; Williams, P., 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Chichester, Massachusetts: John Wiley & Sonc, Ltd.
- [57] Fortis, A., 1984. *Put po Dalmaciji*. Zagreb: Globus.
- [58] French, M. N.; Krajewski, F. W.; Cuykendall, R. R., 1992. Rainfall forecasting in space and time using a neural network. *Journal of Hydrology*, 137, str. 1-31.
- [59] Fritz, F., 1978. Hidrogeologija Ravnih Kotara i Bukovice. U: *Krš Jugoslavije*, 10. Zagreb: Jugoslavenska akademija znanosti i umjetnosti.
- [60] Fritz, F., 1984. Postanak i starost Vranskog jezera kod Biograda na moru. *Geološki vjesnik*, 37, str. 231-243.
- [61] Gajić-Čapka, M.; Guttler, I.; Branković, Č., 2011. Climate and climate change analyses for CC-WaterS project. U: *Zbornik radova 5. hrvatske konferencije o vodama*, Opatija 18.-21.05.2011. Zagreb: Hrvatske vode, str. 109-118.
- [62] Gajić-Čapka, M.; Guttler, I.; Branković, Č., 2011. Contribution to CC-WaterS project: climate and climate change for test beds in Croatia. U: Biondić, D.; Holjević, D.; Tropan, L., ur., *Hrvatske vode pred izazovom klimatskih promjena*. Zagreb: Hrvatske vode, str. 109-118.
-

-
- [63] Gajić-Čapka, M.; Zaninović, K., 2006. Long-Term Trends in Temperature, Precipitation and Runoff at the Croatian Eastern Adriatic Coast. U: Morell, M., ur. U: *Conference on water observation and information system for decision suport Balwois 2006*. Ohrid, 2006.
- [64] Gavazzi, A., 1889. Vransko jezero u Dalmaciji. U: *Rad Jugoslavenske akademije znanosti i umjetnosti*. Matematičko-prirodoslovni razred. Jugoslavenska akademija znanosti i umjetnosti, str. 217-225.
- [65] Gavazzi, A., 1904. *Die Seen des Karstes: Morphologisches Material*. Wien: Lechner.
- [66] Gligora Udovič, M.; Kralj Borojević, K.; Žutinić, P.; Stanković, I.; Dodig, P.; Dautović, J.; Ciglonečki Jušić, I.; Plenković-Moraj, A. Phytoplankton as a fundamentally important predictor of environmental changes in aquatic ecosystems. U: Nakić, Z.; Rubinić, J., ur., *3rd International Conference; Waters in sensitive & protected areas*. Zagreb: Croatian Water Pollution Control Society, str. 53-57.
- [67] Goldscheider, N.; Drew, D., 2007. *Methods in Karst Hydrogeology*. London: Taylor & Francis.
- [68] Grabovšek, F., 2000. *Evolution of early karst aquifers: from simple principles to complex models*. Ljubljana: Institut za raziskovanje, krasa ZRC SAZU, Založba ZRC.
- [69] Hall, M.; Frank, E.; Holmes, G.; Pfahringer, B.; Reutemann, P.; Witten, I. H., 2009. The WEKA Data Mining Software: An Update. *SIGKDD Explorations*, 11(1), str. 10-18.
- [70] Han, J.; Kamber, M., 2001. *Data Mining Concepts And Techniques*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.
-

-
- [71] Hekman, F., 1971. Melioracija Vranskog jezera – Vodoprivredna problematika Vranskog područja. U: Novak, G.; Maštrović, V., ur., *Povijest Vrane: političko, kulturno i privredno značenje Vrane kroz stoljeća*. Zadar: JAZU, str. 469-476.
- [72] Hekman, F., 2006. *Vodno gospodarstvo Dalmacije*. Zagreb: Ex Libris.
- [73] Hjelmfelt, T.A.J.; Wang, M., 1993. Artificial Neural Networks as Unit Hydrograph Applications. U: *Proceedings of the Symposium on Engineering Hydrology*, ASCE, San Francisco.
- [74] Horvat, B.; Rubinić, J., 2003. Primjena GIS-okruženja na procjenu otjecanja. U: Gereš, D., ur. *Hrvatske vode u 21. stoljeću: zbornik radova*. Zagreb: Hrvatske vode, str. 265-271.
- [75] Horvat, B.; Rubinić, J., 2006. Annual runoff estimation - an example of karstic aquifers in the transboundary region of Croatia and Slovenia. *Hydrological Sciences Journal*, 51(2), str. 314-324.
- [76] Hsu, K. L.; Gupta, V.; Sorooshian, S., 1995. Artificial neural network modeling of the rainfall-runoff process. *Water Resources Research*, 31(10), str. 2517-2530.
- [77] Ilakovac, B., 1971. Vranska regija u Rimsko doba. U: Novak, G.; Maštrović, V., ur., *Povijest Vrane: političko, kulturno i privredno značenje Vrane kroz stoljeća*. Zadar: JAZU. str. 75-136.
- [78] Ilakovac, B., 1982. *Rimski akvedukti na području sjeverne Dalmacije*. Zadar: Liber: Arheološki muzej Zadar.
- [79] Ilijanić, N.; Miko, S.; Hasan, O.; Bakrač, K.; Hajek-Tadesse, V.; Banak, A. The Holocene paleolimnology of Lake Vrana (Biograd) and implications to its formation. U: *Knjiga saznanja: 3. znanstveni skup Geologija kvartara u*
-

-
- Hrvatskoj s međunarodnim sudjelovanjem, povodom 130 godina rođenja akademika Marijana Salopeka i u spomen znanstvenici Maji Paunović na 10. obljetnicu smrti, Zagreb, 21. - 23. ožujka 2013, 2013. Zagreb: Hrvatska akademija znanosti i umjetnosti, Zavod za paleontologiju i geologiju kvartara; Ljubljana: Geološki zavod Slovenije, str. 26-26.*
- [80] IRB, *Otkrivanje znanja dubinskom analizom podataka: Priručnik za istraživače i studente*. Dostupno na: <http://lis.irb.hr/Prirucnik/prirucnik-otkrivanje-znanja.pdf> (1.8.2014.)
- [81] IRB, 2012. *Stabla odlučivanja*. Dostupno na: http://dms.irb.hr/tutorial/hr_tut_dtrees.php (1.8.2013.)
- [82] IPCC, 2001. *Climate Change 2001: The scientific Basis*. U: Houghton, J., et al., ur., *Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: CambridgeUniversity Press.
- [83] IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis - Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Dostupno na: www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html (13.1.2012.)
- [84] James, W., 1890. *The principles of psychology*. New York: H. Holt and Company.
- [85] Jevđević, V., 1974. *Stohastički procesi u hidrologiji*. Sarajevo: Poslovna zajednica za izučavanje vodoprivredne problematike krša i Zavod za hidrotehniku Građevinskog fakulteta.
- [86] Jørgensen, S.; Bendoricchio, G., 2001. *Fundamentals of ecological modelling*. Amsterdam: Elsevier Science Ltd.
-

-
- [87] Jukić, D., 2004. *Uloga transfer funkcija pri izradi bilance i modeliranju otjecanja u kršu: disertacija*. Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu.
- [88] Kapelj, S.; Kapelj, J.; Tepeš, P.; Biondić, B., 2008. Coastal Aquifer of the Vransko polje and the Vrana Lake Catchement and Climate Changes - Croatia. U: Taniguchi, M.; Yoshida, R.; Skinner, A.; Aureli, A., ur., *Congress of the International Association of Hydrogeologists - Integrating Groundwater Science and Human Well-being*. Toyama, 2008.
- [89] Katalinić, A.; Rubinić, J., 2012. Pritisak okolišnih čimbenika na sustav Vranskog jezera u Dalmaciji - situacija u 2012. godini. U: Jelaska, S.D.; Klobučar, G.I.V.; Šerić Jelaska, L.; Leljak Levanić, D.; Žaklin, L., ur., *11. Hrvatski biološki kongres: zbornik sažetaka*. Zagreb: Hrvatsko biološko društvo, str. 216-216.
- [90] Katalinić, A.; Rubinić, J.; Bušelić, G., 2007. Hydrology of two coastal karst cryptodepressions in Croatia: Vrana lake vs Vrana lake. U: *Proc. of the 12th World Lake Conference Taal 2007, Jaipur*. Ministry of Environment & Forests Government of India.
- [91] Katalinić, A. et al., 2008. Relation between hydrological characteristics and anthropogenic influence in the context of lake protection – case studies of Plitvice Lakes and Vrana Lake in Dalmatia (Croatia). U: Morell, M.; Popovska, C.; Stojov, V.; Kostofski, G.; Dimitrov, D.; Drobot, R.; Radic, Z.; Selenica, A., ur., *Balwois 2008*. Skopje: Balkan Institute for Water and Environment, str. 326-327
- [92] Klaić, V., 1878. *Prirodni zemljopis Hrvatske*. Zagreb: Matica hrvatska.
-

-
- [93] Kolmogorov, A.N., 1963. On the representation of continuous functions of several variables by superposition of continuous functions of one variable and addition. *American Mathematical Society Translations*, 28(2), str. 55–59.
- [94] Krešić, N., 2009. *Groundwater Resources - Sustainability, Management, and Restoration*. McGraw Hill.
- [95] Kresic, N.; Stevanovic, Z., 2010. *Groundwater Hydrology of Springs - Engineering, Theory, Management and Sustainability*. Elsevier.
- [96] Krešić, N., 1991. *Kvantitativna hidrogeologija karsta sa elementima zaštite podzemnih voda*. Beograd: Naučna knjiga.
- [97] Kundzewicz, Z.W.; Mata, L. J.; Arnell, N. W.; Döll, P.; Jimenez, B.; Miller, K.; Oki, T.; Šen, Z.; Shiklomanov, I., 2008. The implications of projected climate change for freshwater resources and their management. *Hydrological Sciences Journal*, 53(1), str. 3-10.
- [98] Kundzewicz, Z.W.; Arnell, N.W.; Döll, P.; Kabat, P.; Jiménez, B.; Miller, K. A.; Oki, T.; Šen, Z.; Shiklomanov, I., 2007. Freshwater resources and their management. U: M. Parry et al., eds. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press., str. 173-210.
- [99] Kurtanjek, Ž., 2002. *Suvremene metode upravljanja*. Zagreb: PBF, Sveučilište u Zagrebu.
- [100] Lachtermacher, G.; Fuller, J.D., 1993. Backpropagation in Hydrological Time Series Forecasting. U: Hipel, K., ur., *Time Series Analysis and Forecasting, proceedings of the international conference on Stochastic and Statistical Methods in Hydrology and Environmental Engineering, Waterloo*.
-

-
- [101] Lambeck, K.; Antonioli, F.; Purcell, A.; Silenzi, S., 2004. Sea-level change along the Italian coast for the past 10,000yr. *Quaternary Science Reviews*, 23(14-15), str. 1567-1598.
- [102] Lambeck, K.; Purcell, A., 2005. Sea-level change in the Mediterranean Sea since the LGM: model predictions for tectonically stable areas. *Quaternary Science Reviews*, 24(18-19), str. 1969-1988.
- [103] Langbein, W. B., 1962. The water supply of arid valleys in intermountain regions in relation to climate. *IAHS Bull*, 7(1), str. 34-39.
- [104] Larose, D., 2006. *Data mining – Methods and Models*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- [105] Lerman, A., Imboden, D.; Gat, J., 1995. *Physics and Chemistry of Lakes*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- [106] Leroux, M., 2005. *Global Warming - Myth or Reality? - The Erring Ways of Climatology*. Chichester: Springer.
- [107] Lionello, P., Malanotte-Rizzoli, P.; Boscolo, R., ur., 2006. *Mediterranean Climate Variability*. Amsterdam: Elsevier.
- [108] Lončarić, S., 2006. *Višeslojna neuronska mreža – predavanje. Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu*. Dostupno na: <http://ipg.zesoi.fer.hr> (15.3.2006)
- [109] Lvovich, M. I., 1973. *The world's water*. Moscow: Mir Publishers.
- [110] MacCulloch, W. S.; Pitts, W. 1943. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The bulletin of mathematical*, 5(4), str. 115-133.
- [111] Maier H.R.; Dandy G.C., 2000. Application of artificial neural networks to forecasting of surface water quality variables: issues, applications and challenges. U: Govindaraju, R.S.; Rao, A.R., ur., *Artificial Neural Networks in*
-

-
- Hydrology*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, str. 287-309.
- [112] Maillet, E., 1905. *Essais d'Hydraulique Souterraine el Fluviale*. Paris: Herman.
- [113] Mangin, A., 1984. Pour une meilleure connaissance des systemes hydrologiques a partir des analyses correlative et spectrale. *Journal of Hydrology*, 67(1-4), str. 25-43.
- [114] Mayer, 1993. *Kvaliteta i zaštita podzemnih voda*. Zagreb: Hrvatsko društvo za zaštitu voda i mora.
- [115] Mediterranean Groundwater Working Group, 2007. Mediterranean Groundwater Report. Technical report on groundwater management in the Mediterranean. EUWI Med.
- [116] Milosavljević, M. M., 2005. *Neuronske mreže*. Beograd: Elektrotehnički fakultet Beogradskog Univerziteta.
- [117] Ministarstvo zaštite okoliša i prostornog uređenja, 2001. *Prvo nacionalno izvješće Republike Hrvatske prema okvirnoj konvenciji Ujedinjenih naroda o promjeni klime (UNFCCC)*. Zagreb: Ministarstvo zaštite okoliša i prostornog uređenja.
- [118] Minsky, M. L.; Papert, S., 1969. *Perceptrons: an introduction to computational geometry*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- [119] Mlinarić, D., 2009. Privatni projekti isušivanja i melioracije tla u Dalmaciji i Istri od ranog novog vijeka do 20. stoljeća. *Ekonomika i ekohistorija*, 5(5), str. 136 - 157.
-

-
- [120] Morgan, J. N.; Messenger R. C., 1973. THAID: a sequential search program for the analysis of nominal scale dependent variables. Technical report, Institute for Social Research, Univ. of Michigan, Ann Arbor.
- [121] Mrakovčić, M.; Kerovac, M.; Mišetić, S., 2003. Biološka raznolikost i problemi očuvanja biocenoza Vranskog jezera. U: *Round table: Hydrological stabilization and conservation of biodiversity of the Vransko jezero Nature Park catchment area*. Biograd, 2003. Public Institution Nature Park Vransko jezero.
- [122] Novaković, B.; Majetić, D.; Široki, M. *Umjetne neuronske mreže*. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 1998.
- [123] Orlić, M.; Pasarić, M., 1994. Vodostaj Jadranskog mora i globalne klimatske promjene. U: *Pomorski zbornik*, 32. Rijeka, 1994.
- [124] Orlić, M.; Pasarić, M., 2000. Sea-level changes and crustal movements recorded along the east Adriatic coast. *Nuovo Cimento della Societa Italiana di Fisica C-Geophysics & Space Physics*, 23(4), str. 351-364.
- [125] Ožanić, N.; Rubinić, J., 1994. Analiza hidrološkog režima Vranskog jezera na otoku Cresu. *Hrvatske vode*, 8(2), str. 535-543.
- [126] Ožanić, N.; Rubinić, J., 1995. Hidrološki koncept funkcioniranja Vranskog jezera na otoku Cresu. U: *Zbornik radova 1. hrvatske konferencije o vodama*. Zagreb: Hrvatske vode.
- [127] Pal, S.K.; Srimani, P.K., ur., 1996. Special issue on Neural Networks: theory and applications. *IEEE Computer*, 19(3).
- [128] Pal, J. et al., 2007. Regional Climate Modeling for the Developing World: The ICTP RegCM3 and RegCNet. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(9), str. 1395-1409.
-

- [129] Palmer, W.C., 1965. Meteorological drought: Research Paper No. 45. U.S. Weather Bureau.
- [130] Parker, D.B., 1987. Optimal Algorithms for Adaptive Networks: Second order Back Propagation, Second Order Direct Propagation, and Second Order Hebbian Learning. U: *Proceedings of the IEEE First International Conference on Neural Networks, San Diego, CA*. Piscataway, NJ: IEEE, str. 593-600.
- [131] Peričić, Š., 1971. Vranski feud i obitelj Borelli. U: Novak, G.; Maštrović, V., ur. *Povijest Vrane: političko, kulturno i privredno značenje Vrane kroz stoljeća*. Zadar: JAZU, str. 389-412.
- [132] Petrićec, M.; Švonja, M.; Ivanković, I.; Ričković, I., 2011. Režimi oborina i otjecanja na području dalmatinskih slivova. U: *Zbornik radova 5. hrvatske konferencije o vodama, Opatija 18.-21.05.2011*. Zagreb: Hrvatske vode.
- [133] Pirazzoli, P.A., 2000. *Sea-level changes: the last 20 000 years*. Chichester: Wiley.
- [134] Pirazzoli, P.A., 2005. A review of possible eustatic, isostatic and tectonic contributions in eight late-Holocene relative sea level histories from the Mediteran area. *Quaternary Science Reviews*, 24(18-19), str. 1989-2001.
- [135] Quinlan, J. R., 1986. Induction of Decision Trees. *Machine Learning*, 1(1), str. 81-106.
- [136] Quinlan, J.R., 1992. Learning With Continuous Classes. U: Adams, A.; Sterling, L., ur. U: *AI '92: proceedings of the 5th Australian Joint Conference on Artificial Intelligence*, Hobart, Tasmania, 16-18 November 1992. Singapore; River Edge, NJ: World Scientific.
-

-
- [137] Radić, Z.M.; Jovanović, S.; Melovska Trpinac, O., 1986. Regionalne hidrološke analize. U: *Zbornik radova II. kongresa o vodama Jugoslavije*, Ljubljana 27.-29.10.1986, str. 318-330.
- [138] Rizzo, D. M.; Dougherty, D. E., 1994. Characterization of aquifer properties using artificial neural networks: Neural kriging. *Water Resources Research*, 30(2), str. 483-497.
- [139] Roehl, E.A.; Murray, T. 2006. Non-linear, multivariate forecasting of hydrologic and anthropogenic response to meteorological forcing. iEMSs 2006: Summit on Environmental Modelling and Software. Dostupno na: http://www.iemss.org/iemss2006/papers/w10/135_Roehl_1.pdf (1.8.2014.)
- [140] Roehl, E.; Risley, J.; Stewart J.; Mitro, M., 2006. Numerically optimized empirical modeling of highly dynamic, spatially expansive, and behaviorally heterogeneous hydrologic systems – part 1. U: Voinov, A.; Jakeman A.J., Rizzoli. A.E., ur. U: *Proceedings of the iEMSs Third Biennial Meeting: Summit on Environmental Modelling and Software, International Environmental Modelling and Software Society, Burlington, Vermont, July 2006*. Dostupno na: http://www.iemss.org/summit/papers/s9/136_Roehl_1.pdf (1.8.2013.)
- [141] Rogers, L.L.; Dowla, F.U., 1994. Optimization of groundwater remediation using artificial neural networks with parallel solute transport modeling. *Water Resources Research*, 30(2), str. 457-481.
- [142] Romić, D., 1995. Režim vode Vranskog jezera i procjena njene kakvoće za navodnjavanje. *Poljoprivredna znanstvena smotra*, 60(1), str. 27-44.
-

-
- [143] Rosenblatt, F., 1958. The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain Frank Rosenblatt. *Psychological Review*, 65(6), str. 386-408.
- [144] Rožić, I., 1994. Izrada prethodne studije utjecaja na okoliš akumuliranja vode Vranskog jezera. *Hrvatska vodoprivreda*, 3(18), str. 6-7.
- [145] Rubinić, J., 2007. Problemi zaslanjena, korištenja i precrpljivanja priobalnih krških izvora i vodonosnika - primjeri iz sjeverno-jadranskog područja. U: *Priručnik za hidrotehničke melioracije, Knj. 3: Vodnogospodarski aspekti razvoja navodnjavanja u priobalju i krškom zaleđu*. Rijeka: Građevinski fakultet Rijeka, str. 321-387.
- [146] Rubinić, J.; Bošnjak, T.; Pejaković, B.; Švonja, M.; Čuže, M.; Katalinić, A., 2010a. High Waters in Vrana Lake (Dalmatia) – Protection and Risk. U: Morell, M., ur., *Balwois 2010*. Skopje: Balkan Institute for Water and Environment.
- [147] Rubinić, J.; Horvat, B.; Terzić, J.; Bošnjak, T., 2011a. Analiza klimatskih promjena/varijacija na pilot područjima u Hrvatskoj. U: Biondić, D.; Holjević, D.; Tropan, Lj., ur., *Hrvatske vode pred izazovom klimatskih promjena: zbornik radova; 5. hrvatska konferencija o vodama*, Opatija 18.-21. svibnja 2011. Zagreb: Hrvatske vode, str. 119-128.
- [148] Rubinić, J.; Katalinić, A., 2014. Water regime of Vrana Lake in Dalmatia (Croatia): changes, risks and problems. *Hydrological Sciences Journal*, 59.
- [149] Rubinić, J.; Katalinić, A.; Svonja, M.; Gabric, I.; Buselic, G.; Cuze, M.; Horvat, B., 2010b. Salinization of Vrana Lake in Dalmatia Within the Context of Anthropogenic Influences and Climate Changes (Situation in 2008). U:
-

-
- Bonacci, O., ur., *Sustainability of the karst environment - Dinaric karst and other karst regions*. Paris: UNESCO, str. 171-178.
- [150] Rubinić, J.; Ožanić, N., 1992. Hidrološke karakteristike Vranskog jezera na otoku Cresu. *Građevinar*, 44(8), str. 521-530.
- [151] Rubinić, J.; Ožanić, N., 1998. Hidrologija akumulacije Ponikve na otoku Krku. *Građevinar*, 50(2), str. 81-89.
- [152] Rumelhart, D. E.; Hinton, G. E.; Williams, R. J., 1986. Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 323, str. 533–536.
- [153] Salas, J.D.; Deller, J.W.; Yevjevich, V.; Lane, W.L., 1990. *Applied modeling of hydrologic time series*. Littleton: Water resources publications.
- [154] Salas, J. D.; Markus, M.; Tokar, A. S., 2000. Streamflow forecasting based on artificial neural networks. U: Rao, G.; Rao, A. R., ur., *Artificial neural networks in hydrology*. London: Kluwer Academic Publishers, str. 23-52.
- [155] Sáncheza, E.; Gallardo, C.; Gaertnera, M.A.; Arribasa, A.; Castroa, M., 2004. Future climate extreme events in the Mediterranean simulated by a regional climate model: a first approach. *Global and Planetary Change*, 44(1-4), str. 163-180.
- [156] Schallenberg, M., Hall, C.J.; Burns, C.W., 2003. Consequences of climate-induced salinity increases on zooplankton abundance and diversity in coastal lakes. *Marine ecology program series*, 251, str. 181-189.
- [157] Shamseldin, A. Y., 1997. Application of a neural network technique to rainfall-runoff modeling. *Journal of Hydrology*, 199(3-4), str. 272-294.
- [158] Siegert, M. J., 2001. Ice sheets and late Quaternary environmental change. Chichester; New York: John Wiley.
-

-
- [159] Slukan Altić, M., 2003. Povijesna kartografija – kartografski izvori u povijesnim znanostima. Samobor: Meridijani.
- [160] Soulios, G., 1984. Infiltration efficace dans le karst hellenique. *Journal of Hydrology*, 75(1-4), str. 343-56.
- [161] Stabla odlučivanja. Skladistenje.com, 14.05.2002. Dostupno na: <http://www.skladistenje.com/stabla-odlucivanja> (1.8.2014.)
- [162] Stepinac, A., 1969. Otjecanje u dinarskom kršu. U: *Krš Jugoslavije*. Zagreb: JAZU, str. 207-235.
- [163] Surić, M., 2009. Rekonstruiranje promjena morske razine na istočnoj obali Jadrana (Hrvatska) - pregled. *Geoadria*, 14(2), str. 181-199.
- [164] Surić, M.; Juračić, M., 2010. Late Pleistocene – Holocene environmental changes – records from submerged speleothems along the Eastern Adriatic coast (Croatia). *Geologia Croatica*, 63(2), str. 155-169.
- [165] Svensson, C., Kundzewicz, Z.W.; Maurer, T., 2004. Trends in flood and low flow series. Geneve: UNESCO & WMO.
- [166] Šegota, T., 1968. Morska razina u holocenu i mlađem dijelu Würma. *Geografski glasnik*, 30, str. 16-39.
- [167] Šikić, Z.; Pernar, N.; Yerkovich, B.B.; Rogošić, J.; Širac, S., 2013. Influence of water levels of Vrana Lake and the Adriatic Sea to the water chemistry of Vrana lake. *Acta Adriatica*, 54(2), str. 199-212.
- [168] Šošić, I., 2004. *Primijenjena statistika*. Zagreb: Školska knjiga.
- [169] Švel, B., 1994. Vransko jezero – izvorište vode sjeverne Dalmacije. *Građevinar*, 46(6), str. 341-349.
- [170] Šuštarich, F., 1999. Vertical zonation between a cave system and the lowering karst surface; case study: Laški ravnik. *Acta carsologica*, 28, str. 115-138.
-

-
- [171] Švonja, M.; Pavić, I.; Rubinić, J., 2003. Analiza kolebanja karakterističnih prosječnih protoka vodotoka Jadranskog sliva u Hrvatskoj. U: Gereš, D., ur., *Hrvatske vode u 21. stoljeću: zbornik radova*. Zagreb: Hrvatske vode, str. 123-130.
- [172] Tallaksen, L.M.; Van Lanen, H.A.J., 2004. *Hydrological Drought – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. Amsterdam; Boston: Elsevier.
- [173] Terzić, J.; Širac, S.; Miko, S.; Kuschnig, G.; Lukšić, M., 2011. The CC-WaterS project: project presentation with special reference to pilot sites in Croatia. U: Biondić, D.; Holjević, D.; Tropan, Lj., ur. *Hrvatske vode pred izazovom klimatskih promjena: zbornik radova; 5. hrvatska konferencija o vodama*, Opatija 18.-21. svibnja 2011. Zagreb: Hrvatske vode, str. 99-108.
- [174] Tokar, A. S.; Johnson, P.A., 1999. Rainfall-Runoff Modeling Using Artificial Neural Networks. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(3), str. 232–239.
- [175] Tomas, D.; Maldini, K.; Matić, N.; Marijanović Rajčić, M., 2013. Primjena indeksa kvalitete vode u ocjeni kakvoće vode krških jezera. *Hrvatske vode*, 21(86), str. 303-310.
- [176] Trček, B., 2003. *Epikarst zone and the karst aquifer behavior: case study of the Hubelj catchment, Slovenia*. Ljubljana: Geološki zavod Slovenije.
- [177] Turc, L., 1954. Le biland' eau des sols, relation entre les precipitations, l' evaporation et le coulement. Troisieme journees del' hydraulique a Alger.
- [178] University of East Anglia and Handley Centre, 2012. Dostupno na <http://www.cru.uea.ac.uk/> (2.9.2012.)
- [179] Verruijt, A., 1968. A note on the Ghyben-Herzberg formula. *Bulletin of the IASH*, 4/12, str. 43-46.
-

-
- [180] Vilibić, I., 2003. Porast razine mora u Jadranu - dosadašnja saznanja, predviđanja i moguće posljedice. U: Gereš, D., ur. *Hrvatske vode u 21. stoljeću: zbornik radova*. Zagreb: Hrvatske vode.
- [181] Vranić, M., 2010. Dubinska analiza podataka – određeni postupci u području deskriptivne analize. Dostupno na:
http://www.fer.unizg.hr/_download/repository/kvalifik_clanak_Mihaela_Vrani_c.pdf (5.5.2014.)
- [182] Wang, W., 2010. Tutorial for Weka: a data mining tool. Dostupno na:
<https://blog.itu.dk/SPVC-E2010/files/2010/11/wekatutorial.pdf> (1.12.2010.)
- [183] WEKA programski alat za strojno učenje. Dostupno na:
<http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/> (12.12.2008.)
- [184] Werbos, P. J., 1974. *Beyond Regression: New Tools for Prediction and Analysis in the Behavioral Sciences: dissertation*. Harvard University.
- [185] White, W.B., 2002. Dissolution and porosity development in carbonates. U: Gabrovšek, F., ur., *Evolution of Karst: From Prekarst to Cessation*. Carsologica, Ljubljana - Postojna, str. 13-30.
- [186] White, W.B., 2002. Karst hydrology: recent developments and open questions. *Engineering Geology*, 65(1-2), str. 85-105.
- [187] Wilcoxon, F., 1945, Individual Comparisons by Ranking Methods. *Biometrics Bulletin*, 1(6), str. 80-83.
- [188] Winter, T.C., 1976. Numerical simulation analysis of the interaction of lakes and groundwater. United States Geological Survey Professional Paper, 1001, str. 82-115.
- [189] Winter, T.C., 1981. Uncertainties in estimating the water balance of lakes. *Water resources research*, 19(5), str. 1203-1218.
-

-
- [190] Witten, I. H.; Frank, E., 2000. Data mining: practical machine learning tools and techniques with Java implementations. San Francisco, Calif.: Morgan Kaufmann.
- [191] WMO, 1994. *Guide to hydrological practices: data acquisition and processing, analysis, forecasting and other applications*. Geneva: World Meteorological Organization.
- [192] Wood, E.F., 1995. Heterogeneity and scaling land-atmospheric water and energy fluxes in climate systems. U: Feddes. R.A., ur., *Space and Time Scale variability and Interdependencies in Hydrological Processes IAHS*. New York: Cambridge University Press, str. 3-19.
- [193] Zaninović, K.; Gajić-Čapka, M., 2000. Changes in Components of the Water Balance in the Croatian Lowlands. *Theoretical and Applied Climatology*, 65(1-2), str. 111-117.
- [194] Zhang, S. P.; Watanabe, H.; Yamada, R., 1993. Prediction of Daily Water Demands by Neural Networks. Paper presented at the Stochastic and Statistical Methods in Hydrology and Environmental Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada.
- [195] Zhu, M.; Fujita, M., 1993. Application of Neural Networks to Runoff Forecast. Paper presented at the Stochastic and Statistical Methods in Hydrology and Environmental Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada.
- [196] Žugaj, R., 1995. *Regionalna hidrološka analiza u kršu Hrvatske*. Zagreb: Hrvatsko hidrološko društvo.
- [197] Žugaj, R., 2000. Hidrologija. Zagreb: Rudarsko-geološko naftni fakultet.
-

7.2. Ostala neobjavljena dokumentacija

- [1] Denić-Jukić, V., 2002. *Hidrološko gledište otjecanja u kršu: disertacija*. Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu.
 - [2] DHMZ, 1973. *Salinitet Vranskog jezera* (Voditelj zadatka: Pavletić, I.), Zagreb.
 - [3] DHMZ, 2002. *Meteorološka podloga za vodnogospodarsku osnovu Hrvatske* (Voditelj zadatka: Gajić-Čapka, M.), Zagreb.
 - [4] DHMZ, 2011. *Contribution to CC-WaterS project: a study of climate and climate change for three test beds in Croatia*. Zagreb.
 - [5] Đuro Đaković inženjering, 2008. *Mehanička zapornica – brana na kanalu Prosika – Idejno rješenje*. Slavonski Brod.
 - [6] Elektroprojekt, 1983. *Pregrada na Vranskom jezeru – Idejno rješenje*. Zagreb.
 - [7] Geodata, 2014. *Novelacija apsolutnih visinskih kota na području Ravnih Kotara i Vranskog jezera – radni materijali*, Split.
 - [8] Geotehnički fakultet, 2009. *Ocjena stanja i rizika cjelina podzemnih voda na krškom području u Republici Hrvatskoj* (Voditelj zadatka: Biondić, R). Varaždin.
 - [9] Građevinski fakultet Rijeka, 2005. *Vodni resursi i značajke kopnenih voda Istre u sušnim razdobljima – hidrološka studija* (Voditelj zadatka: Rubinić, J.), Rijeka.
 - [10] Građevinski fakultet Rijeka, 2008. *Ocjena stanja i rizika cjelina podzemnih voda na krškom području u Republici Hrvatskoj - definiranje količinskog stanja* (Voditelj zadatka: Rubinić, J.), Rijeka.
-

-
- [11] Građevinski fakultet Rijeka, 2009. *Hidrološka istraživanja na području PP Vransko jezero u kontekstu procjene mogućnosti zaštite jezera od zaslanjenja* (Voditelj zadatka: Rubinić, J.), Rijeka.
- [12] Građevinski fakultet Rijeka, 2011. *Vransko jezero kod Biograda - procjena utjecaja praga na zaštiti jezera od zaslanjivanja i ocjena ekološki prihvatljivog protoka površinskih pritoka* (Voditelj zadatka: Rubinić, J.), Rijeka.
- [13] HGI, 2012. *Vransko jezero - Hidrogeološka istraživanja*, HGI.
- [14] HGI, 2013. *Paleolimnološka istraživanja Vranskog jezera kod Biograda I faza (privremeno izvješće)* (Voditelj zadatka: Miko, S.), Zagreb, 2013.
- [15] Hidroprojekt, 1948. *Melioracija Vranskog područja*, Zagreb.
- [16] Hidroprojekt, 1973. *Ustava na kanalu Prosika – glavni projekt*, Zagreb.
- [17] Hrvatske vode VGO Split, 2009. *Preljevni prag s ribljom stazom u kanalu Prosika*. Split: VGO za vodno područje dalmatinskih slivova.
- [18] Hrvatske vode, 2009. *Preljevni prag s ribljom stazom u kanalu Prosika – idejno rješenje* (Voditelj zadatka: Švonja, M.), Hrvatske vode VGO za vodno područje Dalmatinskih slivova, Split.
- [19] Hrvatske vode VGO Rijeka, 2001. *Vodnogospodarska osnova Hrvatske – I faza, Hidrologija – Istra* (Voditelj zadatka: Rubinić, J.), Rijeka.
- [20] Hrvatska vodoprivreda, 1994. *Vransko jezero - prethodna studija utjecaja na okoliš akumuliranja vode Vranskog jezera*, Zagreb.
- [21] IGI, 1994. *Crpilišta Zadarskog vodovoda. Hidrogeološki istražni radovi za prijedlog zona sanitarne zaštite*. IGI, br. 70/94, Zagreb.
- [22] IGI, 1974. *Vransko jezero kod Biograda - Hidrogeološki odnosi*. Zagreb.
- [23] IGI, 1976. *Ravni kotari – Bukovica – Hidrogeološka studija*. Zagreb: Institut za geološka istraživanja.
-

-
- [24] IGH, 2012. *Studija navodnjavanja Vranskog polja*. Zagreb.
- [25] IGH PC Zagreb, 2013. *Studija navodnjavanja Vranskog polja* (Voditelj zadatka: Babić, M.), Zagreb.
- [26] IGI, 1995. *Hidrogeološka istraživanja za izgradnju zamjenskih crpilišta na području Biograda*. IGI, br.123/95, Zagreb.
- [27] IGI, 1997. *Crpilište Turanjsko jezero kod Biograda na moru. Hidrogeološki istražni radovi za prijedlog I zone sanitarne zaštite*. IGI, br. 74/97, Zagreb.
- [28] IGI, 1999. *Crpilište Turanjsko jezero kod Biograda na moru. Hidrogeološki istražni radovi za prijedlog zona sanitarne zaštite*. IGI, br.125/99, Zagreb.
- [29] Kapelj, J.; Kapelj, S.; Pavičić, A., 2003. Prilog poznavanju hidrogeoloških i hidrokemijskih odnosa u slivu Vranskog polja i jezera. U: *Zbornik radova Hidrološka stabilizacija i očuvanje biološke raznolikosti slivnog područja Parka prirode „Vransko jezero”*. Park prirode Vransko jezero, Biograd, str. 8-13.
- [30] Komunalac Biograd, 1993. *Grupni Vodovod “Biograd na moru”, Opskrba stanovništva iz alternativnih izvora* (Voditelj zadatka: Petračić, A.), Biograd n/m.
- [31] Komunalac Biograd, 1985. *Elaborat o probnom crpljenju preljevnog izvora Begovača u polju Vrana* (Voditelj zadatka: Petračić, A.), Biograd n/m.
- [32] Milosavljević, M.M. 2005. *Neuronske mreže*. Radni materijal uz pedmet Ekspertni sistemi i Veštačka inteligencija i neuronske mreže. Elektrotehnički fakultet Beogradskog Univerziteta, Beograd.
- [33] Pintur, G., 2003. Prijedlog projekta za unaprjeđenje zaštite i očuvanja bioraznolikosti na širem području Parka prirode „Vransko jezero“. U: *Zbornik radova: Hidrološka stabilizacija i očuvanje biološke raznolikosti slivnog*
-

područja Parka prirode "Vransko jezero", Biograd, Park prirode Vransko jezero.

- [34] PP Vransko jezero, 2009. Mrežne stranice Parka prirode Vransko jezero. Dostupno na: <http://vransko-jezero.hr/cms/> (15.11.2009.)
- [35] Radišić, M., 2013. *Modeliranje sušnih razdoblja na Vranskom jezeru (Dalmacija) metodama strojnog učenja: diplomski rad*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka.
- [36] Romić, D. 1994. *Navodnjavanje zaslanjenim vodama u agroekološkim uvjetima Vranskog bazena: disertacija*. Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
- [37] Rubinić, J.; Kuhta, M.; Brkić, Ž., 2011b. WP 4: Availability of Water Resources. Test Area Vrana Lake - Cres Island, Croatia, EU Project CC-WaterS - Climate Change and Impacts on Water Supply. Croatian Geological Survey, Zagreb.
- [38] Rubinić, J.; Terzić, J.; Marković, T., Horvat, B. 2011c. WP 4: Availability of Water Resources. Test Area Bokanjačko Blato, North Dalmatia, Croatia, EU Project CC-WaterS - Climate Change and Impacts on Water Supply. Croatian Geological Survey, Zagreb.
- [39] Rubinić, J.; Terzić, J.; Marković, T., Horvat, B. 2011d. WP 4: Availability of Water Resources. Test Area Blatsko polje, Korčula Island, Croatia, EU Project CC-WaterS - Climate Change and Impacts on Water Supply. Croatian Geological Survey, Zagreb.
- [40] Šperac, M., 2004. *Upotrebljivost neuralnih mreža za određivanje otjecanja u sustavu urbane odvodnje: disertacija*. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
-

- [41] Švonja, M., 2003. Hidrologija Vranskog jezera. U: *Zbornik radova Hidrološka stabilizacija i očuvanje biološke raznolikosti slivnog područja Parka prirode "Vransko jezero", Biograd, Park prirode Vransko jezero.*
- [42] Teodolit, 2012. *Batimetrijski snimak Vranskog jezera, Zadar.*
- [43] Zekić-Sušac, M., 2006. *Pojam, razvoj i algoritmi neuronskih mreža. Predavanja iz predmeta Metodologija neuronskih mreža.* Ekonomski fakultet u Osijeku.

POPIS TABLICA

Tablica 3.1.	Osnovne informacije o hidrološkim postajama DHMZ-a na širem prostoru Vranskoga jezera s podacima o praćenju hidroloških veličina	49
Tablica 3.2.	Prikaz tipova problema i tehnika njihova rješavanja (IRB, http://lis.irb.hr/Prirucnik/prirucnik-otkrivanje-znanja.pdf).....	65
Tablica 5.1.	Unutargodišnja raspodjela karakterističnih mjesečnih i godišnjih vrijednosti oborina s postaje Biograd n/m (1961.-2012.)	84
Tablica 5.2.	Unutargodišnja raspodjela karakterističnih srednjih mjesečnih i srednjih godišnjih vrijednosti temperature zraka s postaje Biograd n/m (1961.-2012.).....	85
Tablica 5.3.	Vjerojatnosti pojavljivanja maksimalnih godišnjih temperature zraka i minimalnih godišnjih količina oborina (1961./62.–2011./12.)	86
Tablica 5.4.	Karakteristične mjesečne i godišnje razine vode Vranskoga jezera na postaji Prosika (1948.-2012.)	87
Tablica 5.5.	Karakteristične mjesečne i godišnje razine mora na postaji Prosika – Jadransko more (1986.-2012.)	89
Tablica 5.6.	Vjerojatnosti pojavljivanja ekstremnih razina vode Vranskoga jezera na postaji Prosika na osnovi podataka iz razdoblja (1948.-2012.)	93
Tablica 5.7.	Karakteristične vrijednosti protoka na hidrološkim postajama u slivu Vranskoga jezera.....	94
Tablica 5.8.	Unutargodišnja raspodjela karakterističnih protoka u slivu Vranskoga jezera.....	95
Tablica 5.9.	Osnovni statistički pokazatelji zabilježenih maksimalnih godišnjih dotoka u Vransko jezero, s proračunatim vjerojatnostima njihovih pojavljivanja (1948.-2008.)	98
Tablica 5.10.	Osnovni statistički pokazatelji zabilježenih pojava maksimalnih godišnjih volumena dotoka u Vransko jezero, kao i proračunatih vjerojatnosti njihovih pojavljivanja (1948.-2008.).....	98
Tablica 5.11.	Osnovni elementi provednoga općenitog bilančnog proračuna dotoka u jezero (1961.-1990)	99
Tablica 5.12.	Prosječne vrijednosti osnovnih ulaznih elemenata i rezultata proračuna mjesečne bilančne analize (1997.-2008.).....	106
Tablica 5.13.	Prikaz osnovnih statističkih značajki povijesnih i generiranih 30-godišnjih vremenskih nizova podataka o dotocima u Vransko jezero.....	111
Tablica 5.14.	Prikaz odstupanja (u %) osnovnih statističkih značajki generiranih 30-godišnjih vremenskih nizova podataka o dotocima u Vransko jezero u odnosu na povijesni niz (1961.–1990.)	112

Tablica 5.15.	Ispitivanje homogenosti modelima generiranih nizova podataka (2012.-2100.) s podacima povijesnog niza (1951.-2011.)	113
Tablica 5.16.	Trendovi nagiba povijesnih i generiranih serija karakterističnih pokazatelja.....	114
Tablica 5.17.	Unutargodišnja raspodjela elektroprovodljivosti (μScm^{-1}) na pojedinim mjestima uzorkovanja na Vranskome jezeru tijekom razdoblja (2000.-2009.) te usporedba s 2012. godinom	118
Tablica 5.18.	Unutargodišnja raspodjela sadržaja klorida (mgL^{-1}) na pojedinim mjestima uzorkovanja na Vranskome jezeru tijekom razdoblja (2000.-2009.) te usporedba s 2012. godinom	118
Tablica 5.19.	Karakteristične ekstremne vrijednosti elektroprovodljivosti i sadržaja klorida na pojedinim lokacijama uzorkovanja na Vranskome jezeru (Kotarka ušće i Crkvine kamp) za razdoblje (1981.-2012.), a Prosika za razdoblje (2000.-2012.) – s prekidima	119
Tablica 5.20.	Prikaz odstupanja (u %) osnovnih statističkih značajki generiranih 30-godišnjih vremenskih nizova podataka o srednjim godišnjim dotocima analiziranih jezera u odnosu na povijesni niz (1961.–1990.).....	141
Tablica 5.21.	Prikaz odstupanja (u %) karakterističnih pokazatelja odabranih scenarija različitih klimatskih prilika u odnosu na odgovarajuće podatke iz razdoblja (1961.-1990.)	144
Tablica 5.22.	Prikaz osnovnih rezultata provedenih modeliranja srednjih dnevnih razina vode u Vranskom jezeru za testno razdoblje (2006.-2008.)	148
Tablica 5.23.	Prikaz osnovnih rezultata modeliranja srednjih dnevnih razina vode u Vranskome jezeru s vremenskim pomakom od 3, 6 i 9 mjeseci za testno razdoblje (2006.-2008.).....	150
Tablica 5.24.	Prikaz osnovnih rezultata modeliranja sadržaja klorida u Vranskome jezeru na mjernoj postaji Crkvine kamp ovisno o sadržaju klorida na postajama Prosika i Kotarka kamp i drugim utjecajnim čimbenicima modelom regresijskog stabla.....	152
Tablica 5.25.	Prikaz regresijske jednadžbe sadržane u modelu regresijskoga stabla za ocjenu sadržaja klorida na postaji Crkvine kamp	152
Tablica 5.26.	Prikaz osnovnih rezultata modeliranja sadržaja klorida u Vranskome jezeru na mjernoj postaji Crkvine kamp ovisno o sadržaju klorida na postajama Prosika i Kotarka i drugim utjecajnim čimbenicima modelom neuronske mreže	153
Tablica 5.27.	Prikaz osnovnih rezultata modeliranja sadržaja klorida u Vranskome jezeru na postaji Crkvine kamp ovisno o utjecajnim hidrološkim čimbenicima modelom regresijskoga stabla.....	155
Tablica 5.28.	Prikaz regresijskih jednadžbi sadržanih u modelu regresijskoga stabla za ocjenu sadržaja klorida na postaji Crkvine kamp	156

Tablica 5.29.	Prikaz osnovnih rezultata provedenih modeliranja sadržaja klorida na postaji Crkvine kamp na Vranskome jezeru u ovisnosti o utjecajnim hidrološkim čimbenicima modelom neuronske mreže.....	157
Tablica 5.30.	Prikaz osnovnih rezultata provedenih modeliranja sadržaja klorida u Vranskome jezeru na postaji Kotarka ušće ovisno o utjecajnim hidrološkim čimbenicima modelom regresijskoga stabla	158
Tablica 5.31.	Prikaz osnovnih rezultata provedenih modeliranja sadržaja klorida na postaji Kotarka ušće na Vranskom jezeru modelom regresijskog stabla	159
Tablica 5.32.	Prikaz osnovnih rezultata provedenih modeliranja sadržaja klorida na postaji Kotarka ušće u Vranskome jezeru ovisno o utjecajnim hidrološkim čimbenicima modelom neuronske mreže.....	161
Tablica 5.33.	Prikaz osnovnih rezultata provedenih modeliranja sadržaja klorida u Vranskome jezeru na postaji Prosika ovisno o utjecajnim hidrološkim čimbenicima modelom regresijskoga stabla	162
Tablica 5.34.	Prikaz osnovnih rezultata provedenih modeliranja sadržaja klorida na postaji Prosika u Vranskom jezeru modelom regresijskoga stabla	163
Tablica 5.35.	Prikaz osnovnih rezultata provedenih modeliranja sadržaja klorida na postaji Prosika na Vranskome jezeru ovisno o utjecajnim hidrološkim čimbenicima modelom neuronske mreže	164

POPIS SLIKA

Slika 2.1.	Generalni konceptualni model prihranjivanja i djelovanja pojedinih dijelova krškog vodonosnika - dopunjeno prema Bakalowicz-u (2004)	9
Slika 2.2.	Ravnoteža slane i slatke vode u priobalnim vodonosnicima u skladu s Ghyben- Herzbergovim hidrostatskim zakonom - prema Verruijtu (1968)	10
Slika 2.3.	Shematski prikaz cirkulacije podzemnih voda u priobalnom krškom vodonosniku uz pretpostavku postojanja formirane stabilne vodne leće tijekom dugotrajnijih sušnih razdoblja (Rubinić, 2007)	12
Slika 2.4.	Shematski prikaz cirkulacije podzemnih voda u priobalnom krškom vodonosniku u uvjetima nagloga dotoka većih voda nakon dugotrajnoga sušnog razdoblja (Rubinić, 2007)	13
Slika 2.5.	Shematski prikaz cirkulacije podzemnih voda u priobalnom krškom vodonosniku u uvjetima stabilizacije novoga stanja ravnoteže slatkih i slanih voda nakon prolaska prve faze nailaska većih voda (Rubinić, 2007)	14
Slika 2.6.	Globalne promjene temperature na Zemlji tijekom posljednjih 18.000 godina (Siegert, 2001)	16
Slika 2.7.	Promjene razine Jadranskoga mora tijekom kasnoga pleistocena i holocena (YD – Younger Dryas) (HGI, 2013– modificirano prema Correggiari i sur., 1996)	16
Slika 2.8.	Prikaz anomalija godišnjih globalnih temperatura zraka za razdoblje (1850.-2011.), u odnosu na razdoblje (1961.-1990.) (University of East Anglia and Handley Centre, 2012)	17
Slika 2.9.	Prikaz zabilježenog hoda i procjena porasta globalne razine svjetskih oceana (Antonioli i Silenzi, 2007)	18
Slika 2.10.	Značajniji prodori mora u priobalne vodonosnike Mediterana (izvor karte - ustupljeno od Gabrić I.)	20
Slika 2.11.	Vransko jezero a) Jezero i priobalje s otocima b) Priobalni prostor Vranskoga jezera koji predstavlja idealno stanište za velik broj bioloških vrsta (izvor fotografije – arhiv PP Vransko jezero)	21
Slika 2.12.	Granice zaštićenih područja na širem području Vranskoga jezera - preuzeto (PP Vransko jezero, 2009 – prema DZZP, 2009)	22
Slika 2.13.	Prikaz položaja Vranskoga jezera u Dalmaciji i njegova sliva (Rubinić i sur., 2010b)	22
Slika 2.14.	Kanal Prosika – pogled s morske strane (izvor fotografije – arhiv PP Vransko jezero)	23

Slika 2.15.	Hidrogeološka karta sliva Vranskoga jezera (HGI, 2012) s označenim položajem triju dubokih bušotina (B-1, BK-1, BK-2) na kojima su provedena ispitivanja kakvoće voda po dubini (Kapelj S. i sur., 2008).....	26
Slika 2.16.	Raspodjela el. vodljivosti u bušotinama B-1, BK-1 i BK-2 u Vranskom polju (Kapelj S. i sur., 2008)	31
Slika 2.17.	Shematizirani hidrogeološki presjek: a) recentno razdoblje b) tijekom holocena (Kapelj S. i sur., 2008)	32
Slika 2.18.	Izvorišne zone najintenzivnije povezanosti jezera i mora: a) Izvor Jugovir - mjesto vrlo izraženog utoka zaslanjenih voda u jezero, b) bočati izvori u zaljevu kod Prosike.....	32
Slika 2.19.	Batimetrijski snimak dna Vranskoga jezera: a) situacijski snimak, b) presjek A-A, c) presjek B-B – pripremljeno prema premjeru Teodolita (2012)	34
Slika 2.20.	Prikaz odnosa površina (F) i volumena (V) Vranskoga jezera	35
Slika 2.21.	Prikaz Vranskoga jezera na karti osmanlijskih osvajanja u Dalmaciji Jana Janssoniusa (Slukan Altić, 2003).....	35
Slika 2.22.	Prikaz Vranskog jezera na karti zadarskoga okružja Corronelli-ja iz 1688.g. (Slukan Altić, 2003)	36
Slika 2.23.	Situacija Vranskoga jezera i močvarnoga područja sadašnjega Vranskog polja prije prokopa kanala Prosika – plan vojnoga inženjera Lodolija iz 1746. (izvor: fotografija plana iz arhiva obitelji Borelli)	37
Slika 2.24.	Kanal Prosika: a) Poprečni profili kanala Prosika iz 18.stoljeća (fotografija iz arhiva obitelji Borelli; b) Nizvodni dio kanala Prosika s izvedenim fiksnim pragom (fotografija iz arhiva PP Vransko jezero)	40
Slika 2.25.	Shematizirana hidrogeološka karta - prema Fritzu (1984)	44
Slika 2.26.	Shematizirani presjek kroz Vransko jezero i okolni vodonosnik - prema Fritzu (1984)	44
Slika 2.27.	Detalji poprečnog presjeka kroz karbonatni hrbat koji dijeli Vransko jezero od mora s karakterističnim hidrološkim međuodnosima slane i slatke vode: a) stanje visokih razina vode u jezeru tijekom vodnoga hidrološkog razdoblja, b) stanje visokih razina tijekom sušnoga hidrološkog razdoblja, c) stanje niskih razina vode u jezeru tijekom sušnoga hidrološkog razdoblja	44
Slika 3.1.	Situacija Vranskoga jezera i Vranskoga polja s prikazom položaja mjernih postaja državnoga monitoringa: Hidrološke postaje (1-Prosika/Vransko jezero, 2-Prosika/ more, 3-Pakoštanski most/Vransko jezero, 4-Vrana/Lateralni kanal, 5-Burski most/Jablanski kanal, 6-Jankolovica/Glavni kanal, 7-Oporičev most nizv./Pećina, 8-Vrana/Škorobić, 9-Benkovac (Kličevica), Mjesta uzorkovanja kakvoće vode (A-Prosika, B-Crkvine kod autokampa, C-Kotarka ušće) te klimatološka (KL-Biograd na moru) i kišomjerna postaja (KI-Stankovci)	46

Slika 3.2.	Srednje godišnje temperature zraka za postaju Zadar - produljeno s modelom: a) RegCM3 b) Aladin, s ucrtanim vrijednostima prosječnog trenda kao i prosječnim vrijednostima i standardnim odstupanjima za tri referentna 30-godišnja razdoblja P0, P1 i P2 – (Gajić-Čapka i sur., 2010)	57
Slika 3.3.	Godišnje količine oborina za postaju Zadar - produljeno s modelom: a) RegCM3 b) Aladin, s ucrtanim vrijednostima prosječnog trenda kao i prosječnim vrijednostima i standardnim odstupanjima za tri referentna razdoblja P0, P1 i P2 – (Gajić-Čapka i sur., 2010).....	57
Slika 3.4.	Odnos $Q/K = f(P/K)$ po metodi Langbeina.....	60
Slika 3.5.	Testiranje primjene metode Langbeina na odabranim slivovima hidroloških postaja u Istri - međuodnos srednjih godišnjih protoka određenih na osnovi mjerenja i njihovih proračunatih vrijednosti po metodi Langbeina za referentno 30-godišnje razdoblje 1961.-1990.	61
Slika 3.6.	Osnovne faze procesa inteligentne analize podataka prema CRISP-DM standardu (Cross Industry Standard Process for Data Mining) (http://www.crisp-dm.org/CRISPWP-0800.pdf).	64
Slika 3.7.	Shematski prikaz biološke živčane stanice/biološkoga neurona (Zekić-Sušac, 2006).....	68
Slika 3.8.	Struktura jednostavnoga umjetnog neurona po modelu MacCulloch i Pittsa – preuzeto od Novakovića i sur. (1998).....	68
Slika 3.9.	Prikaz strukture i koncepta višeslojne perceptronske mreže - a) strukturni graf s ulaznim i izlaznim slojem te dva skrivena sloja; b) prikaz rasprostiranja signala – unaprijedna propagacija funkcijskog signala i propagacija signala pogreške unazad (Parker, 1987).....	70
Slika 3.10.	Osnovni nelinearni model neurona (Milosavljević, 2005).....	71
Slika 3.11.	Shema višeslojne mreže sa prostiranjem signala unaprijed (Milosavljević, 2005).....	72
Slika 3.12.	Učenje neuronske mreže s učiteljem (Milosavljević, 2005).....	73
Slika 3.13.	Opća shema obučavanja i-toga neurona (Milosavljević, 2005).....	73
Slika 3.14.	Višeslojni perceptron s jednim skrivenim slojem (Milosavljević, 2005)	74
Slika 3.15.	Primjer regresijskoga stabla odlučivanja (IRB, 2012).....	80
Slika 5.1.	Usporedni hod a) srednjih godišnjih temperature zraka b) godišnjih količina oborina s klimatoloških postaja Zadar i Biograd n/m za razdoblje 1961./62.-2011./12.....	83
Slika 5.2.	Unutargodišnja raspodjela palih oborina na postaji Biograd n/m (1961.-2012.).....	84
Slika 5.3.	Unutargodišnja raspodjela srednjih mjesečnih temperature zraka na postaji Biograd n/m (1961.-2012.)	85

Slika 5.4.	Hod karakterističnih godišnjih vrijednosti vodostaja (“MAX”-maksimalni, “SR”- srednji i “MIN”- minimalni) u Vranskom jezeru zabilježenih na postaji Prosika (1948.-2012.) s istaknutim njihovim prosječnim vrijednostima	88
Slika 5.5.	Hod karakterističnih godišnjih vrijednosti razina mora (“MAX”-maksimalne, “SR”-srednje i “MIN”- minimalne) zabilježenih na postaji Prosika – Jadransko more (1948.-2012.) s istaknutim trendovima njihova hoda	89
Slika 5.6.	Unutargodišnja raspodjela prosječnih maksimalnih, srednjih i minimalnih razina vode u jezeru i moru na lokalitetu Prosika (1998.-2012.).....	90
Slika 5.7.	Unutargodišnja raspodjela pojava ekstremnih razina vode u Vranskom jezeru (1948.-2012.)	91
Slika 5.8.	Međuodnos maksimalnih godišnjih razina vode i: a) minimalnih godišnjih razina, b) godišnjih amplitude kolebanja razine vode u Vranskom jezeru.....	91
Slika 5.9.	Autokorelacijske funkcije kolebanja razine vode u Vranskom jezeru: a) godišnjih vrijednosti minimalnih i maksimalnih razina vode, b) srednjih dnevnih razina vode	92
Slika 5.10.	Hod srednjih mjesečnih protoka tijekom godine na hidrološkim postajama na slivnom području Vranskoga jezera	96
Slika 5.11.	Ukupno izmjereno srednje godišnje dotjecanje u Vransko jezero i srednje godišnje istjecanje kroz kanal Prosiku.....	96
Slika 5.12.	Prostorna raspodjela specifičnih protoka u slivu Vranskoga jezera (1961.-1990.).....	100
Slika 5.13.	Međuodnos srednjih godišnjih protoka Krke na Skradinskom buku i ukupnih dotoka u Vransko jezero s na postajama u Vranskom polju s hidrološki kontroliranog dijela sliva	101
Slika 5.14.	Međuodnos prosječnih ukupnih srednjih godišnjih dotoka u Vransko jezero s kontroliranoga dijela sliva i prosječnih istjecanja iz jezera kanalom Prosika.....	103
Slika 5.15.	Regionalne značajke ovisnosti srednjih godišnjih koeficijenata otjecanja o palim oborinama na krškom području Hrvatske	105
Slika 5.16.	Bilančno proračunati površinski dotoci te ukupni dotoci u hidrološki sustav Vranskoga jezera umanjeni za gubitke na poniranje (1.1997. - 7.2009.)	107
Slika 5.17.	Prikaz proračunatih mjesečnih vrijednosti ukupnih dotoka i gubitaka iz Vranskoga jezera po pojedinim godinama (1997.-2008.).....	108
Slika 5.18.	Konceptualni model generiranja srednjih godišnjih dotoka sa sliva Vranskoga jezera (1951.-2100.).....	109
Slika 5.19.	Prikaz povijesnih (1951.-2011.) i modelima generiranih podataka (2012.-2100.) vremenskih nizova dotoka u Vransko jezero s odgovarajućim trendom za cjelokupno analizirano razdoblje prema modelima: a) RegCM3 i b) Aladin.....	111

Slika 5.20.	Međuodnos protoka proračunatih srednjih godišnjih vrijednosti proračunatih ukupnih dotoka i gubitaka na osnovi mjesečne vodne bilance (Q_{VB}) i srednjih godišnjih dotoka određenih modeliranjem na temelju klimatoloških podataka (Q_M)	115
Slika 5.21.	Međuodnos elektroprovodljivosti i sadržaja klorida po pojedinim lokacijama uzorkovanja s pripadajućim regresijskim jednadžbama i koeficijentom korelacije „k“	117
Slika 5.22.	Hod kolebanja elektroprovodljivosti na trima postajama državnoga monitoringa u Vranskome jezeru (1982.-2012.) s trendom	120
Slika 5.23.	Hod kolebanja sadržaja klorida na trima postajama državnog monitoringa u Vranskome jezeru (1982.-2012.) s trendom	120
Slika 5.24.	Usporedni prikaz unutargodišnje raspodjele srednjega mjesečnog sadržaja klorida u vodi Vranskoga jezera na trima lokacijama i srednje mjesečne razine vode u jezeru (2000.-2009.)	122
Slika 5.25.	Prikaz dinamike kolebanja mjesečnih podataka o sadržaju klorida na trima postajama u Vranskome jezeru s usporednim prikazom dinamike kolebanja dnevnih razina vode u jezeru na postaji Prosika i dnevnih dotoka kanalom Kotarka (1996.-2012.)	124
Slika 5.26.	Prikaz karakterističnih hidroloških elemenata i rezultata uzorkovanja sadržaja klorida u Vranskom jezeru tijekom iznimno sušne 2008. godine	126
Slika 5.27.	Prikaz karakterističnih hidroloških elemenata i rezultata uzorkovanja sadržaja klorida u Vranskom jezeru tijekom vodne 2010. godine	127
Slika 5.28.	Prikaz karakterističnih hidroloških elemenata i rezultata uzorkovanja sadržaja klorida u Vranskom jezeru tijekom ekstremno sušne 2012. godine	128
Slika 5.29.	Autokorelacijske funkcije mjesečnih podataka o sadržaju klorida na trima lokacijama u Vranskom jezeru (2000.-2009.)	132
Slika 5.30.	Prikaz rezultata regionalizacije koeficijenta trenda opadanja srednjih godišnjih protoka tijekom referentnoga 30-godišnjeg razdoblja (1961.-1990.) u hrvatskom dinarskom kršu te pripadajuća prosječna krivulja i minimalna anvelopa	134
Slika 5.31.	Modularne vrijednosti hoda i odgovarajući trendovi karakterističnih godišnjih vrijednosti odabranih hidroloških pokazatelja u vodnom sustavu Vranskog jezera (1961.-2010.)	136
Slika 5.32.	Prikaz položaja Vranskoga jezera na otoku Cresu (1), Bokanjačkoga blata (2), Vranskoga jezera kod Biograda n/m (3), Baćinskih jezera (4) te Blatskoga polja (5)	137
Slika 5.33.	Usporedni prikaz kolebanja srednjih godišnjih razina vode u analiziranim priobalnim krškim jezerima istočne obale Jadranskog mora	138
Slika 5.34.	Usporedni prikaz autokorelacijskih funkcija srednjih godišnjih razina vode	139

Slika 5.35.	Usporedni prikaz autokorelacijskih funkcija srednjih dnevnih razina vode	139
Slika 5.36.	Usporedni prikaz izmjerenih i modelom neuronskih mreža proračunatih vrijednosti srednjih dnevnih razina vode u Vranskom jezeru za testno razdoblje (2006.-2008.).....	147
Slika 5.37.	Usporedni prikaz izmjerenih podataka o srednjim dnevnim razinama vode u Vranskome jezeru te podataka njihovih procjena odabranim modelima neuronskih mreža s vremenskim pomakom od 3, 6 i 9 mjeseci za testno razdoblje (2006.-2008.).....	149
Slika 5.38.	Usporedni prikaz izmjerenih i modelima regresijskoga stabla i neuronskih mreža proračunatih vrijednosti sadržaja klorida u Vranskome jezeru na mjernoj postaji Crkvine kamp u ovisnosti o sadržaju klorida na postajama Prosika i Kotarka ušće, kao i drugim utjecajnim čimbenicima, za testno razdoblje (2006.-2008.).....	153
Slika 5.39.	Regresijsko stablo za ocjenu sadržaja klorida u Vranskome jezeru na postaji Crkvine kamp (simboli i jednačbe s dane slike sadržani u tablici 5.4.).....	155
Slika 5.40.	Usporedni prikaz izmjerenih i modelima regresijskoga stabla i neuronskih mreža proračunatih vrijednosti sadržaja klorida u Vranskome jezeru na mjernoj postaji Crkvine kamp ovisno o utjecajnim hidrološkim čimbenicima za testno razdoblje (2006.-2008.)	157
Slika 5.41.	Regresijsko stablo za ocjenu sadržaja klorida u Vranskome jezeru na postaji Kotarka ušće (simboli i jednačbe s dane slike sadržani u tablici 5.31.).....	160
Slika 5.42.	Usporedni prikaz izmjerenih i modelima regresijskoga stabla i neuronskih mreža proračunatih vrijednosti sadržaja klorida u Vranskome jezeru na mjernoj postaji Kotarka ušće ovisno o utjecajnim hidrološkim čimbenicima, za testno razdoblje (2006.-2008.)	160
Slika 5.43.	Regresijsko stablo za ocjenu sadržaja klorida u Vranskome jezeru na postaji Prosika (simboli i jednačbe sa slike sadržani su u tablici 5.34.).....	162
Slika 5.44.	Usporedni prikaz izmjerenih i modelima regresijskoga stabla i neuronskih mreža proračunatih vrijednosti sadržaja klorida u Vranskome jezeru na mjernoj postaji Prosika ovisno o utjecajnim hidrološkim čimbenicima za testno razdoblje (2006.-2008.).....	163
Slika 5.45.	Usporedni prikaz izmjerenih i modelom neuronskih mreža proračunatih vrijednosti srednjih dnevnih razina vode u Vranskom jezeru s vremenskim pomakom od tri mjeseca za testno razdoblje (2006.-2008.)	165

ŽIVOTOPIS

Josip Rubinić rođen je u Rijeci 18.3.1957. godine, a od 1988. stanuje u Mošćenicama. Završio je diplomski studij na Fakultetu graditeljskih znanosti u Rijeci (1980.), poslijediplomski magistarski studij na Građevinskome fakultetu u Splitu (2001.), a poslijediplomski doktorski studij upisao je 2010. na Građevinskome fakultetu u Rijeci. Radno iskustvo započeo je u Vodoprivredi Rijeka (1980.-1990. - samostalni projektant hidrolog) te ga nastavio u Labinu (1991.-1996. JVP istarskih slivova kao voditelj vodnogospodarskog sektora; 1997.-1999. Hrvatske vode VGI Labin kao voditelj vodnogospodarske ispostave) i Rijeci (2000.–2002. Hrvatske vode VGO Rijeka – Glavni inženjer). Od 2003. zaposlen je na Građevinskom fakultetu u Rijeci kao viši predavač iz predmeta Hidrosustavi u kršu, Vodoprivredni sustavi, Čišćenje pitkih i otpadnih voda, Zbrinjavanje onečišćenih voda i otpada, Vodogradnje, Prirodne osnove vodnih pojava u priobalju, Osnove hidrotehnike, Urbani vodni sustavi te Vodni sustavi i resursi, u okviru kojih je bio mentor ili komentor u preko sedamdeset diplomskih ili završnih radova.

U svome znanstvenom radu sudjelovao je na devet projekata koje je financiralo Ministarstvo znanosti (na jednome kao voditelj projekta), na šest međunarodnih projekata (na tri kao voditelj znanstvenog dijela projekta hrvatske strane), autor/koautor je preko 140 znanstvenih i stručnih radova (<https://bib.irb.hr/lista-radova?autor=224273>) te je recenzent u tri inozemna i pet domaćih znanstvenih časopisa. Član je petero strukovnih društava i sudjelovao je na preko stotinu stručnih i znanstvenih skupova. Stručna djelatnost vezana je uz vođenje i/ili sudjelovanje na projektima tematski vezanih uz hidrološku problematiku slivova i vodnih resursa na području krškoga dijela Hrvatske, posebno u domeni vodoistražnih

radova i hidrologije jezera i izvorišta te upravljanja i zaštite voda. Među nagradama i priznanjima izdvajaju se godišnja nagrada Hrvatskih voda za najbolji magistarski rad iz područja hidrotehnike i vodnog gospodarstva u 2001. godini te odlukom Hrvatskog državnog Sabora imenovanje članom Nacionalnog vijeća za vode (2000.-2004.) iz reda istaknutih znanstvenika i stručnih djelatnika iz područja upravljanja vodama i tome srodnih područja.

POPIS OBJAVLJENIH RADOVA

Izvorni znanstveni radovi u CC časopisima

- [1] Rubinić, J.; Katalinić, A., 2014. Water regime of Vrana Lake in Dalmatia (Croatia): changes, risks and problems. *Hydrological Sciences Journal*, 59(10), str. 1908-1924.
- [2] Mance, D.; Hunjak, T.; Lenac, D.; Rubinić, J.; Roller-Lutz, Z., 2014. Stable Isotope Analysis of the Karst Hydrological Systems in the Bay of Kvarner (Croatia). *Applied Radiation and Isotopes*, 90, str. 23-34.
- [3] Bonacci, O.; Rubinić, J., 2009. Water losses from a reservoir built in karst: the example of the Boljunčica reservoir (Istria, Croatia). *Environmental geology (Berlin)*, 58(2), str. 339-345.
- [4] Horvat, B.; Rubinić, J., 2006. Annual runoff estimate - an example of karstic aquifers in the transboundary region of Croatia and Slovenia. *Hydrological Sciences Journal*, 51(2), str. 314-324.
- [5] Gereš, D.; Rubinić, J.; Ožanić, N., 2000. Ecological incidents in Northern Adriatic Karst (Croatia). *Water science and technology* 42(1-2), str. 281-285.

Uredničke knjige

- [6] Nakić, Z.; Rubinić, J., ur., 2013. Proceedings 3rd International Conference; Waters in sensitive and protected areas. Zagreb: Croatian water pollution control society.
- [7] Rubinić, J.; Zmaić, B., ur., 2009. Suvremene metode odvodnje oborinskih voda urbanih sredina na obalnim područjima. Rijeka: Hrvatsko društvo za zaštitu voda; Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci.

Poglavlja u knjizi

- [8] Biondić, R.; Biondić, B.; Rubinić, J.; Meaški, H., 2013. Quality and quantity status and risk assessment of groundwater bodies in the karst area of Croatia. U: Maloszewski, P.; Witczak, S. i Malina, G., ur. Groundwater Quality Sustainability; International Association of hydrogeologists selected papers. Leiden: CRC Press/Balkema. Str. 163-172.
- [9] Rubinić, J.; Katalinić, A.; Švonja, M.; Gabrić, I.; Bušelić, G.; Čuže, M.; Horvat, B., 2010. Salinization of Vrana Lake in Dalmatia Within the Context of Anthropogenic Influences and Climate Changes (Situation in 2008). U: Bonacci, O., ur. Sustainability of the karst environment - Dinaric karst and other karst regions. Paris: UNESCO. Str. 171-178.
- [10] Rubinić, J., 2007. Problemi zaslanjena, korištenja i precrpljivanja priobalnih krških izvora i vodonosnika - primjeri iz sjeverno-jadranskog područja. U: Ožanić, N.; Benac, Č.; Delula Tibljaš, A., Vrkljan, I., ur. Knj. 3: Vodnogospodarski aspekti razvoja navodnjavanja u priobalju i krškom zaleđu Hrvatske. Rijeka: Građevinski fakultet Rijeka. Str. 321-387.
- [11] Rubinić, J., 2005. Aktualni vodnogospodarski aspekti razvoja navodnjavanja na primjeru hidromelioracijskog sustava Čepić polja. U: Ožanić, N., ur., Priručnik

- za hidrotehničke melioracije, III kolo, knjiga 2, Elementi planiranja sustava za navodnjavanje. Rijeka: Liber. Str. 249-264.
- [12] Globevnik, L.; Holjević, D.; Petkovšek, G.; Rubinić, J., 2003. Applicability of the Gavrilović method in erosion calculation using spatial data manipulation techniques. U: Boer, D. et al., ur., Erosion prediction in ungauged basins: integrating methods and techniques. Wallingford: International Association of Hydrological Sciences, 2003.
- [13] Globevnik, L.; Holjević, D.; Petkovšek, G.; Rubinić, J., 2003. Applicability of the Gavrilović method in erosion calculation using spatial data manipulation techniques. U: De Boer, D., et al., ur., Erosion prediction in ungauged basins: integrating methods and techniques. Wallingford, Oxfordshire, UK: International Association of Hydrological Sciences, str. 224–233.
- [14] Rubinić, J., 2003. Bilanciranje akumulacija za navodnjavanje. U: Ožanić, N., ur., Priručnik za hidrotehničke melioracije. Rijeka: Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci. Str. 239-268.

Znanstveni i stručni radovi u drugim časopisima

- [15] Cindrić, K.; Nimac, I.; Gajić-Čapka, M., Rubinić, J., 2014. Vremenske promjene kratkotrajnih jakih oborina u razdoblju 1955.-2010. za Split i Varaždin. *Hrvatske vode*, 22(89), str. 239-250.
- [16] Maglica, A.; Rubinić, J., 2013. Analiza hidroloških međuodnosa na prostoru Cerknjskog i Planinskog polja (Slovenija). *Zbornik radova Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci*, 16(1), str. 41-62.
- [17] Karleuša, B.; Arbanas, Ž.; Rubinić, J., 2010. Sedimentacijski procesi u akvatorijima luka smještenih na ušćima rijeka. *Pomorski zbornik*, 46(1), str. 39-50.
- [18] Šuljić, A.; Rubinić, J., 2010. Analiza vodnog režima Vranskog jezera u Dalmaciji. *Zbornik radova Građevinskoga fakulteta Sveučilišta u Rijeci*, 13(1), str. 91-112.
- [19] Wöfl, H.; Volf, G.; Rubinić, J., 2010. Modelska analiza navodnjavanja kišnicom na jadranskim otocima. *Zbornik radova Građevinskoga fakulteta Sveučilišta u Rijeci*, 13(1), str. 113-130.
- [20] Hinić, V.; Rubinić, J.; Vučković, I.; Ružić, I.; Gržetić, A.; Volf, G.; Ljubotina, M.; Kvas, N., 2008. Analysis of interrelation between water quality and hydrologic conditions on a small karst catchment area of sinking watercourse Trbuhovica. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 4(1), str. 1-8.
- [21] Ružić, I.; Rubinić, J.; Ožanić, N., 2007. Modeliranje sintetičkih nizova podataka – primjer modeliranja mjesečnih količina oborina. *Građevinar*, 59(8), str. 665-673.
- [22] Rubinić, J.; Kogovšek, J.; Diković, S.; Petrič, M.; Hrvojić, E.; Knez, M.; Slabe, T., 2006. Vode gornjeg i srednjeg toka rijeke Mirne. *Hrvatske vode*, 14(54), str. 1-14.
- [23] Rubinić, J.; Ožanić, N., 2005. The relation between intensive daily and annual precipitation quantities at The Gorski Kotar Area (Croatia). *Hrvatski meteorološki časopis*, 40(40), str. 631-633.
- [24] Zwicker, G.; Rubinić, J., 2005. Water level fluctuations as an indicator of tufa barrier growth dynamics in the Plitvice Lakes. *RMZ - Materials and geoenvironment*, 52(1), str. 161-163.

-
- [25] Rubinić, J., 2004. Vodnogospodarska problematika Istre. *Hrvatska vodoprivreda* 13(143), str. 52-55.
- [26] Benac, Č.; Rubinić, J.; Karleuša, B.; Jardas, B.; Oštrić, M., 2003. Changes of Hydrogeological Conditions Provoked by Construction in the Coastal Zone of Rijeka. *RMZ - Material and Geoenvironment*, 50(1), str. 21-24.
- [27] Benac, Č.; Rubinić, J.; Ožanić, N., 2003. The Origine and Evolution of Coastal and Submarine Springs in Bakar bay. *Acta Carsologica*, 32(1), str. 157-171.
- [28] Kogovšek, J.; Diković, S.; Petrič, M.; Rubinić, J.; Knez, M.; Hrvojić, E.; Slabe, T., 2003. Hydrochemical research of The Mlini springs, Istria. *Annales: anali za istrske in mediteranske študije. Series historia naturalis*, 13(1); str. 91-102.
- [29] Ožanić, N.; Rubinić, J., 2003. The regime of inflow and runoff from Vrana Lake and the risk of permanent water pollution. // *RMZ - Materials and Geoenvironment*, 50(1), str. 281-284.
- [30] Ožanić, N.; Rubinić, J., 2003. Hidrološke podloge pri planiranju hidromelioracijskih sustava i upravljanja njima. *Hrvatske vode*, 11(45), str. 389-399.
- [31] Rubinić, J., 2001. HIS 2000 - nova baza hidroloških podataka. *Hrvatska vodoprivreda*, 10(102), str. 64-65.
- [32] Rubinić, J.; Margeta, J., 2001. Dimenzioniranje akumulacija primjenom generiranih protoka. *Građevinar*, 53(1), str. 17-23.
- [33] Rubinić, J.; Gereš, D.; Ožanić, N.; Čosić-Flajsig, G., 2000. Hidrološki elementi vodnogospodarskih osnova i planova. *Hrvatska vodoprivreda*, 9(90), str. 17-21.
- [34] Gereš, D.; Ožanić, N.; Rubinić, J., 2000. Odnos razvoja poljoprivrede i šumarstva i vodnih resursa u kršu. *Hrvatske vode*, 8(33), str. 313-319.
- [35] Rubinić, J.; Batelić, A.; Kukuljan, I., 2000. Hidrološka analiza pojave zaslanjenja Labinskog izvorišta vodoopskrbe Fonte Gaia u rujnu 1998. godine. *Hrvatske vode*, 8(30), str. 17-24.
- [36] Ožanić, N.; Rubinić, J., 1999. Sliv rijeke Mirne-Hidrološke značajke kao osnova gospodarenja vodama. *Hrvatska vodoprivreda*, 8(78), str. 5-9.
- [37] Rubinić, J.; Bušelić, G.; Kukuljan, I.; Kosović, M., 1999. Hidrološka analiza suspendiranog nanosa u istarskim vodama. *Hrvatske vode*, 7(21), str. 127-137.
- [38] Rubinić, J.; Ožanić, N., 1998. Hidrologija akumulacije Ponikve na otoku Krku. *Građevinar*, 50(2), str. 81-89.
- [39] Ožanić, N.; Rubinić, J., 1997. Hidrološka ocjena ugroženosti Vranskog jezera od utjecaja prometnice Cres-Lošinj. *Hrvatska vodoprivreda*, 6 (62-63), str. 44-45.
- [40] Ožanić, N.; Rubinić, J.; Kamber, S.; Diković, S., 1997. Ekološki incident-tone mazuta u koritu Pazinčice. *Hrvatska vodoprivreda*, 6(62-63), str. 85-92.
- [41] Ožanić, N.; Rubinić, J., 1996. Problemi praćenja stanja i gospodarenja vodnim resursima na primjenu sliva Rječine. *Hrvatska vodoprivreda*, 5(50), str. 41-45.
- [42] Rubinić, J., 1996. Problemi rada melioracijskog sustava Donje Raše u Istri. *Hrvatska vodoprivreda*, 5(47-48), str. 24-28.
- [43] Rubinić, J.; Kukuljan, I., 1996. Pazinčica najveća istarska ponornica. *Hrvatska vodoprivreda*, 5(44), str. 20-24.
- [44] Rubinić, J., 1995. Poplava u Istri 1993. godine i rad akumulacija. *Građevinar*, 47(6), str. 331-338.
- [45] Ožanić, N.; Rubinić, J., 1994. Analiza hidrološkog režima Vranskog jezera na otoku Cresu. *Hrvatske vode*, 2(8), str. 535-543.
-

- [46] Rubinić, J., 1994. Hidrološke karakteristike pojava iznimnih poplava na području Istre 22/23. listopada 1993. U: Izvanredne meteorološke i hidrološke prilike ... u Hrvatskoj, 17, str.161-167.
- [47] Rubinić, J., 1994. Uz 130. obljetnicu organiziranog djelovanja vodoprivrede u Istri - razvoj hidrologije u Istri. *Hrvatska vodoprivreda*, 3(21-22), str.12-13.
- [48] Rubinić, J., 1994. Hidrološki aspekti gospodarenja akumulacijskim vodnim prostorima u Istri. *Hrvatska vodoprivreda*, 3(26), str. 31-34.
- [49] Rubinić, J.; Ožanić, N., 1992. Hidrološke karakteristike Vranskog jezera na otoku Cresu. *Građevinar*, 44(8), str. 521-530.

Objavljena pozvana predavanja na skupovima

- [50] Rubinić, J.; Babić, S.; Lenac, D., 2009. Odvodnja oborinskih voda s prometnica u zaštićenim krškim područjima: rješenja i dileme iz Hrvatske. U: Stergar, B., ur., *Odvodnjavanje cest: zbornik referatov strokovnega posvetovanja*. Ljubljana: DRC, Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije, str. 49-66.
- [51] Rubinić, J.; Lukarić, S.; Rukavina, J., 2009. Inženjersko sagledavanje kratkotrajnih jakih oborina - primjer riječkog područja. U: Rubinić, J.; Zmaić, B., ur., Konferencija s međunarodnim sudjelovanjem *Suvremene metode odvodnje oborinskih voda urbanih sredina na obalnim područjima*, Rijeka, 19. - 21. ožujka 2009.: zbornik radova. Rijeka: Hrvatsko društvo za zaštitu voda i Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, str. 176-193.

Znanstveni radovi u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom

- [52] Krkač, M.; Mihalić Arbanas, S.; Arbanas, Ž.; Bernat, S.; Špehar, K.; Watanabe, N.; Nagai, O.; Sassa, K.; Marui, H.; Furuya, G.; Wang, C.; Rubinić, J.; Matsunami, K., 2014. Review of Monitoring Parameters of the Kostanjek Landslide (Zagreb, Croatia). U: Sassa, K.; Canuti, P.; Yin, Y., ur., *Proceedings of the 3rd World Landslide Forum, Landslide Science for a Safer Geoenvironment: Volume 2: Methods of Landslide Studies*. Cham: Springer, str. 637-645.
- [53] Kajtezović, N; Rubinić, J., 2013. Water and research of underground habitats in protected areas - example of protozoa research in Veternica cave (Medvednica Nature park, Croatia). U: Nakić, Z.; Rubinić, J., ur., *Waters in Sensitive and Protected Areas*. Zagreb: Croatian Water Pollution Control Society, str. 150-153.
- [54] Mance, D.; Lenac, D.; Hunjak, T.; Roller-Lutz, Z.; Rubinić, J., 2013. Monitoring of hydrogen and oxygen stable isotopes changes for the purpose of water protection: the case of Rijeka town springs. U: Nakić, Z.; Rubinić, J., ur., *Waters in sensitive & protected areas*. Zagreb: Croatian water pollution control society, str. 175-178.
- [55] Margeta, J.; Rubinić, J., 2013. Integrated approach to the discharge of treated urban wastewater into karst aquifers. U: Nakić, Z.; Rubinić, J., ur., *3rd International Conference Waters in Sensitive & Protected Areas*. Zagreb: Društvo za zaštitu voda Hrvatske, str. 95-99.
- [56] Rubinić, J.; Čuže-Denona, M.; Bošnjak, T.; Katalinić, A., 2012. Hidrološki aspekti procjene ekološki prihvatljivog protoka u površinskim pritocima

- Vranskog jezera u Dalmaciji. U: Lučić, I.; Mulaomerović, J. (ur.). *Čovjek i krš 2011: zbornik radova*. Međugorje; Sarajevo: Fakultet dr. Milenko Brkić Sveučilišta Hercegovina; Centar za krš i speleologiju, str. 185-201.
- [57] Rubinić, J.; Žic, E.; Travaš, V., 2012. Sea level influence on high water occurrence in coastal urban areas – Umag case study. U: Prodanović, D.; Plavšić, J., ur., *Proceedings of the Ninth International Conference on Urban Drainage Modelling*. Beograd: Građevinski fakultet u Beogradu, str. 215-216.
- [58] Biondić, R.; Biondić, B.; Rubinić, J.; Meaški, H., 2010. Quality and quantity status and risk assessment of groundwater bodies in karst areas of Croatia. U: Zuber, A.; Kania, J.; Kmiecik, E., ur., *XXXVIII IAH Congress Groundwater Quality Sustainability Krakow, 12-17 september 2010: extended abstracts*. Krakow: University of Silesia Press, str. 801-807.
- [59] Oštrić, M.; Horvat, B.; Lončarić-Trinajstić, I.; Benac, Č.; Ružić, I.; Rubinić, J., 2010. Research of water resources on karst island on the example of Krk island (Croatia). U: Morell, M. (ur.). *Balwois 2010: Conference on water observation and information system for decision support: proceedings*. Skopje: Balkan Institute for Water and Environment.
- [60] Rubinić, J.; Bošnjak, T.; Pejaković, B.; Švonja, M.; Čuže, M.; Katalinić, A., 2010. High Waters in Vrana Lake (Dalmatia) – Protection and Risk. U: Morell, M. (ur.). *Balwois 2010: Conference on water observation and information system for decision support: proceedings*. Skopje: Balkan Institute for Water and Environment.
- [61] Vurmek, M.; Brozinčević, A.; Bušelić, G.; Zwicker Kompar, G.; Rubinić, J., 2010. Intra-Annual Dynamics Of Water Quality Changes In Plitvice Lakes Spring Zone. U: Morell, M. (ur.). *Balwois 2010: Conference on water observation and information system for decision support: proceedings*. Skopje: Balkan Institute for Water and Environment.
- [62] Karleuša, B.; Magaš, O.; Rubinić, J.; Palinić, N., 2009. Rječina River Basin Restoration (Croatia). U: Popovska, C.; Jovanovski, M., ur., *WMHE 2009. Vol.1.: Eleventh International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering*. Skopje: Faculty of Civil Engineering, University St. Cyril and Methodius, str. 873-884.
- [63] Ožanić, N.; Karleuša, B.; Rubinić, J., 2009. Odvodnja oborinskih voda urbanog sliva Škurinjskog potoka - problematika i rješenja. U: Rubinić, J.; Zmaić, B., ur., *Zbornik radova konferencije: Suvremene metode odvodnje oborinskih voda urbanih sredina na obalnim područjima*. Rijeka: Hrvatsko društvo za zaštitu voda, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, str. 234-246.
- [64] Bušelić, G.; Rubinić, J., 2008. Comparison of Suspended Load Transport Regime at Characteristic Hydrometric Stations in Croatia. U: Morell, M. (ur.). *Balwois 2010: Conference on water observation and information system for decision support: proceedings*. Skopje: Balkan Institute for Water and Environment.
- [65] Karleuša, B.; Deluka-Tibljaš, A.; Rubinić, J., 2008. Specijalistički stručni studij građevinarstva kao pretpostavka cjeloživotnog učenja za održivi razvitak. U: Uzelac, V.; Vujičić, L., ur., *Cjeloživotno učenje za održivi razvoj*. Rijeka: Učiteljski fakultet u Rijeci, str. 339-352.
- [66] Katalinić, A.; Zwicker, G.; Brozincević, A.; Peros-Pucar, D.; Rubinić, J., 2008. Relation between hydrological characteristics and anthropogenic influence in the context of lake protection – case studies of Plitvice Lakes and Vrana Lake in

- Dalmatia (Croatia). U: Morell, M. ; Popovska, C., Stojov, V, Kostofski, G., Dimitrov, D., Drobot, R., Radic, Z., Selenica, A., ur., *Balwois 2008: Conference on water observation and information system to decision support: proceedings*. Skopje: Balkan Institute for Water and Environment.
- [67] Ožanić, N.; Karleuša, B.; Rubinić, J.; Deluka Tibljaš, A., 2008. Hidrometrija i visokoškolsko obrazovanje u graditeljstvu. U: Ožanić, N., ur., *Savjetovanje Hidrološka mjerenja i obrada podataka, Nacionalni park Plitvička jezera 26.-28. studeni 2008.: zbornik radova*. Rijeka: Građevinski fakultet Sveučilišta; Zagreb: Hrvatsko hidrološko društvo, str. 383-405.
- [68] Ružić, I.; Feretić, S.; Ožanić, N.; Rubinić, J., 2008. Modeling Synthetic Data Series - Monthly Precipitation Using Pseudorandom Scalar Numbers. U: Morell, M., ur., *Balwois 2008: Conference on water observation and information system for decision support: proceedings*. Skopje: Balkan Institute for Water and Environment.
- [69] Zwicker, G.; Travica, T.; Bušelić, G.; Rubinić, J., 2008. Comparison of spring discharge on the three most important high-karst rivers in Croatia – Kupa, Gacka and Una. U: Brilly, M.; Šraj, M., ur., *XXIVth Conference of the Danubian Countries on the Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management*. Ljubljana: Slovenian National Committee for the IHP UNESCO, str. 131-131.
- [70] Katalinić, A.; Rubinić, J.; Bušelić, G., 2007. Hydrology of two coastal karst cryptodepressions in Croatia: Vrana lake vs Vrana lake. U: *Proceedings of the 12th World Lake Conference (Taal2007)*. Jaipur: Ministry of Environment & Forests, Government of India, str. 732-743.
- [71] Rubinić, J.; Ružić, I.; Mihalić, I.; Oštrić, M., 2007. Analysis of changes in sedimentation process in the Boljunčica basin and the Plomin bay due to draining of the Čepić lake and building of storage reservoir Boljunčica - Istria (Croatia). U: Kostadinov, S.; Bruk, S.; Walling, D., ur., *Erosion and torrent control as a factor in sustainable river basin management*. Beograd: Faculty of Forestry, str. 251-258.
- [72] Rubinić, J.; Zwicker, G.; Buselić, G.; Bjelobaba, M., 2007. Water Resources and Processes in Protected Areas - Plitvice Lakes National Park, Risnjak National Park and Učka Nature Park. U: Nakić, Z., ur., *Second International Conference on Waters in Protected Areas, Dubrovnik, Croatia, 24 -28 April 2007: proceedings*. Zagreb: Croatian Water Pollution Control Society, str. 54-47.
- [73] Ožanić, N.; Rubinić, J.; Karleuša, B.; Holjević, D., 2005. Problems of High Water Appearances in Urban Areas. U: Nachtnebel, H.P.; Jugović, C.J., ur., *Proceedings of IX. International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, Ottenstein, Austria, September 4 – 7, 2005*. Vienna: BOKU - University of Natural Resources and Applied Life Sciences, str. 395-402.
- [74] Rubinić, J.; Fistanić, I., 2005. Application of time series modeling in karst water management. U: Stevanović, Z.; Milanović, P. *Water Resources and Environmental Problems in Karst: proceedings of the International Conference and Field Seminars, Belgrade & Kotor, Serbia & Montenegro, 13-19 September 2005*. Belgrade: Institute of Hydrogeology, Faculty of Mining and Geology, str. 417-422.

- [75] Ožanić, N.; Rubinić, J.; Karleuša, B.; Holjević, D., 2004. The Revitalisation of Cultural Hereditary Buildings in Water Streams. U: Gereš, D., ur., *3rd ECRR International Conference on River Restoration in Europe: River restoration 2004 (RR 2004): principles, processes, practices: proceedings*. Zagreb: Hrvatske vode, str. 263-271.
- [76] Karleuša, B.; Oštrić, M.; Rubinić, J., 2003. Vodnogospodarski elementi prostornog planiranja u kršu na primjeru sliva Rječine. U: Goluža, M., ur., *Voda u krsu u slivova Cetine, Neretve i Trebisnjice: Zbornik radova. Znanstveno-strucni simozij s međunarodnim sudjelovanjem Voda u krsu u slivova Cetine, Neretve i Trebisnjice, Neum, 25.-27. rujana 2003*. Mostar: Sveučilište u Mostaru, str. 85-94.
- [77] Gereš, D.; Ožanić, N.; Rubinić, J., 2002. Analysis of Water Use in Croatia on Principles of sustainable Development. U: Stadin, F., ur., *21st Conference of the Danubian countries on the hydrological forecasting and hydrological bases of water management, Bucharest, Romania, 2-6 September 2002*. Bucharest: National Institut of Meteorology and Hydrology.
- [78] Ožanić, N.; Rubinić, J.; Gereš, D., 2002. Hydrological Bases of Regional Management of Water Reserves in the High Karst as Exemplified by the Upper Part of the Kupa River Catchment Area. U: Stadin, F., ur., *21st Conference of the Danubian countries on the hydrological forecasting and hydrological bases of water management, Bucharest, Romania, 2-6 September 2002*. Bucharest: National Institut of Meteorology and Hydrology, str. 117-124.
- [79] Rubinić, J.; Ožanić, N., 2002. Stochastic modelling of accumulation behaviour on the example of accumulation with losses. U: Kovar, K., ur., *4th International Conference on Calibration and Reliability in Groundwater Modelling: a few steps closer to reality: prepublished proceedings of the ModelCARE'2002 conference held in Prague, Czech Republic, from 17 to 20 June 2002*. Praha: Univ. Karlova, Nakl. Karolinum, 2002., str. 180-182.
- [80] Gereš, D.; Ožanić, N.; Rubinić, J., 2001. Water resources management planning in Croatia. U: Bednarczyk, S.; Szymkiewicz, R.; Suligowski, Z., ur., *Water management and hydraulic engineering*. Gdansk: Faculty of Hydro and Environmental Engineering, Technical Unive., str. 141 – 148.
- [81] Gereš, D.; Rubinić, J.; Ožanić, N., 2001. Ground water management in the karstic zones in Croatia. U: Ribeiro, L., ur., *Future ground water resources at risk*. Lisbon: Instituto Superior Tecnico, str. 487-494.
- [82] Gereš, D.; Rubinić, J.; Ožanić, N., 2001. Groundwater management in the karstic zones in Croatia. U: Ribeiro, L., ur., *Proceedings of the 3rd International Conference on Future Groundwater Resources at Risk*. Lisbon: GeoSystems center, str. 487-494.
- [83] Ožanić, N.; Rubinić, J., 2001. Hydraulic Limitation of Exploitation Vrana Lake for Water Supply (Croatia). U: Li, G., ur., *Hydraulics of rivers, water works and machinery; proceedings of Theme D. Vol. 1; 29th IAHR Congress: 21st Century: the New Era for Hydraulic Research and Its Applications, Beijing, China, September 16-21, 2001*. Beijing: IAHR Congress, str. 100-106.
- [84] Rubinić, J.; Ožanić, N., 1999. Influence of the Sedimentation Process on the Raša River Mouth on the Outflow Regime of Coastal Springs. U: Bergman, H.; Krainer, R.; Breinhaelter, H., ur., *Proceedings: XXVIII AHR Congress*. Grac: International Association for Hydraulic, str. 41-48.

-
- [85] Ožanić, N.; Rubinić, J., 1998. Analysis of the Discharge Fluctuation Trends in the Mountain Part of the Kupa River Catchment Area. U: Gereš, D., ur., *Proceedings: XIXth Conference of the Danube Countries on Hydrological Forecasting and Hydrological of Water Management, Osijek, (15. - 19. Juni 1998.)*. Zagreb: Hrvatske vode, 1998., str. 371-377.
- [86] Rubinić, J.; Ožanić, N., 1998. Razvoj hidroloških istraživanja i upravljanja vodnim resursima u kršu na primjeru istarskog područja. U: Plenković, J. et al., ur., *Tehnologija i razvoj društva*. Rijeka: Građevinski fakultet: Hrvatsko komunikološko društvo, 1998., str. 90-96.
- [87] Rubinić, J.; Ožanić, N.; Kukuljan, I., 1998. Hydrological Aspects of Revitalization of Upper and Mid Part of River Mirna Stream as a part of Integral Basin Management. U: Petraš, J., ur., *Proc. International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering*. Dubrovnik: Građevinski fakultet Zagreb, str. 378-387.
- [88] Ožanić, N.; Rubinić, J., 1997. Analysis of the appearance of extremely low water levels of the Vrana lake on Cres island (Croatia). U: Brilly, M.; Gustard, A., ur., *LOC proceedings of oral presentations FRIEND'97: 3rd international conference on FRIEND: regional hydrology: concepts and models for sustainable water resources management, Postonja, Slovenija 1-4 October 1997*. Ljubljana: University of Ljubljana, 1997., str. 75-81.
- [89] Ožanić, N.; Rubinić, J., 1997. Protection of the Natural Phenomen of the Vrana Lake on the Island Cres (Croatia). U: Shady, A.M., ur., *Proceeding IX World Water Congress, Montreal*. Montreal: University of Montreal, str. 327-338.
- [90] Ožanić, N.; Rubinić, J., 1997. Trendovi kolebanja protoka - element gospodarenja vodnim resursima riječkog područja. U: Plenković, J., ur., *Zbornik radova znanstvenog skupa Društvo i tehnologija '97*. Rijeka: Građevinski fakultet Rijeka i Hrvatsko komunikološko društvo, str. 105-111.
- [91] Rubinić, J.; Gereš, D.; Hrvojić, E.; Ožanić, N., 1997. Regional hydrological analysis and management of water resurces of the Istrian peninsula – Croatia. U: Brilly, M.; Gustard, A., ur., *LOC proceedings of oral presentations FRIEND'97: 3rd international conference on FRIEND: regional hydrology: concepts and models for sustainable water resources management, Postonja, Slovenija 1-4 October 1997*. Ljubljana: University of Ljubljana, 1997., str. 155-157.
- [92] Rubinić, J.; Ožanić, N., 1997. Increasing the Resources of Underground Water In Karst Accumulation of Ponikve on Island Krk (Croatia). U: Shady, A.M., ur., *Proceeding IX World Water Congress, Montreal*. Montreal: University of Montreal, str. 193-203.
- [93] Ožanić, N.; Rubinić, J., 1996. Analysis of Hidrological Characteristic of Križ Potok - a Small Streamflow in the Mountain Part of Croatia. U: Gereš, D., ur., *Proceedings: XIXth Conference of the Danube Countries on Hydrological Forecasting and Hydrological of Water Management, Osijek, (15. - 19. Juni 1998.)*. Zagreb: Hrvatske vode, 1998., str. 53-58.
- [94] Ožanić, N.; Rubinić, J., 1996. Hidrološki aspekti problematike gospodarenja vodnim resursima grada Rijeke. U: Plenković, J., ur., *Zbornik radova znanstvenog skupa Društvo i tehnologija 96*. Rijeka: Građevinski fakultet Rijeka i Ivan Murin d.o.o. Rijeka, str. 80-87.
- [95] Rubinić, J.; Ožanić, N., 1996. Variability of heavy intensity rainfall appearances and their influence on effective runoff. U: Nestroy, O., ur., *Proc. XVIIIth*
-

Conference of the Danube Countries. Graz: Technische universitat Graz, str. 75-81.

- [96] Ožanić, N.; Rubinić, J., 1995. Zaštita prirodnog fenomena Vranskog jezera na Cresu. U: Plenković, J., ur., *Zbornik radova znanstvenog skupa Društvo i tehnologija*. Rijeka: Građevinski fakultet Rijeka, str. 477-483.

Drugi radovi u zbornicima skupova s recenzijom

- [97] Brozinčević, A.; Vurnek, M.; Zwickek Kompar, G.; Bušelić, G.; Rubinić, J., 2013. Changes in dynamic of fluctuation in water level of Kozjak and Prošćansko lakes and possible influences. U: Nakić, Z.; Rubinić, J.; ur., *3rd International Conference; Waters in sensitive & protected areas*. Zagreb: Croatian Water Pollution Control Society, str. 136-140.
- [98] Katalinić, A.; Čuže-Denona, M.; Rubinić, J., 2013. Critical Situations and Water Management Issues in Vransko Lake Nature Park. U: Nakić, Z.; Rubinić, J., ur., *3rd International Conference; Waters in sensitive & protected areas*. Zagreb: Croatian Water Pollution Control Society, str. 154-157.
- [99] Rubinić, J.; Goreta, G.; Giljušić, M.; Marguš, D.; Bošnjak, T., 2013. Characteristics of the Krka River based on assessment of data obtained from regular water monitoring. U: Nakić, Z.; Rubinić, J., ur., *3rd International Conference; Waters in sensitive & protected areas*. Zagreb: Croatian Water Pollution Control Society, str. 183-187.
- [100] Bušelić, G.; Bošnjak, T.; Rubinić, J., 2012. Hydrological Monitoring of Water Supply Sources in Istria as a Basis for Regional Analysis and Regional Water Resources Management. U: Morell, M.; Popovska, C.; Morell, O.; Stojov, V., ur., *Balwois 2012: Conference on water observation and information system to decision support: proceedings*. Skopje: Balkan Institute for Water and Environment.
- [101] Katalinić, A.; Čuže Denona, M.; Rubinić, J., 2012. Vrana Lake in Dalmatia - Water, Surroundings and Protection. U: Morell, M.; Popovska, C.; Morell, O.; Stojov, V., ur., *Balwois 2012: Conference on water observation and information system to decision support: proceedings*. Skopje: Balkan Institute for Water and Environment.
- [102] Uzelac, T.; Sošić, K.; Rubinić, J.; Prhat, D., 2012. Integral approach to the design of storm water drainage in the town of Pula. U: Prodanović, D.; Plavšić, J., ur., *Urban Drainage Modelling: extended abstracts of the Ninth International Conference on Urban Drainage Modelling, Belgrade, 4-6 September 2012*. Belgrade: Faculty of Civil Engineering, str. 213-214.
- [103] Biondić, R.; Biondić, Božidar; Rubinić, J.; Meaški, H., 2011. Ocjena stanja i rizika cjelina podzemnih voda na krškom području Republike Hrvatske. U: Biondić, D.; Holjević, D.; Tropan, Lj., ur., *Hrvatske vode pred izazovom klimatskih promjena: zbornik radova; 5. hrvatska konferencija o vodama, Opatija 18.-21. svibnja 2011*. Zagreb: Hrvatske vode, str. 479-489.
- [104] Mance, D.; Lenac, D.; Hunjak, T.; Roller-Lutz, Z.; Rubinić, J., 2011. Monitoring riječkih izvora - razvoj, promjene, saznanja i problemi. U: Biondić, D.; Holjević, D.; Tropan, Lj., ur., *Hrvatske vode pred izazovom klimatskih promjena: zbornik radova; 5. hrvatska konferencija o vodama, Opatija 18.-21. svibnja 2011*. Zagreb: Hrvatske vode, str. 541-549.
- [105] Mihalić Fabris, I.; Rubinić, J.; Ravlić, N., 2011. Akumulacije za navodnjavanje u Istri – razvoj ideja i novi pristupi. U: Biondić, D.; Holjević, D., Tropan, Lj.,

- ur., *Zbornik radova 5. hrvatske konferencije o vodama*. Zagreb: Hrvatske vode, str. 873-881.
- [106] Rubinić, J.; Horvat, B.; Terzić, J.; Bošnjak, T., 2011. Analiza klimatskih promjena/varijacija na pilot područjima u Hrvatskoj. U: Biondić, D.; Holjević, D.; Tropan, Lj., ur., *Hrvatske vode pred izazovom klimatskih promjena: zbornik radova; 5. hrvatska konferencija o vodama, Opatija 18.-21. svibnja 2011.* Zagreb: Hrvatske vode, str. 119-128.
- [107] Rubinić, J.; Mihovilović, M., 2011. Regionalna analiza kolebanja razina podzemnih voda u Istri. U: Biondić, D.; Holjević, D., Tropan, Lj., ur., *Zbornik radova 5. hrvatske konferencije o vodama*. Zagreb: Hrvatske vode, str. 511-520.
- [108] Lenac, D.; Rubinić, J.; Elkasović, E., 2009. Problematika oborinskih voda u kontekstu zaštite vodnih resursa u kršu : primjer izvorišta u slivu Rječine U: Rubinić, J.; Zmaić, B., ur., *Konferencija s međunarodnim sudjelovanjem Suvremene metode odvodnje oborinskih voda urbanih sredina na obalnim područjima, Rijeka, 19. -21. ožujka 2009.: zbornik radova*. Rijeka: Hrvatsko društvo za zaštitu voda i Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, str. 300-311.
- [109] Pilko, J.; Rukavina, J.; Lukarić, S.; Rubinić, J., 2009. Uspostava monitoringa i razvoj informatičkog alata za obradu oborina na širem području Rijeke. U: Beslić, M.; Ban, D., ur., *Aktuelna problematika u vodoopskrbi i odvodnji*. Ičići: Revelin d.o.o., str. 307-315.
- [110] Hinić, V.; Rubinić, J.; Vučković, I.; Ružić, I.; Gržetić, A.; Volf, G.; Ljubotina, M.; Kvas, N., 2008. Analysis of mutual influences of water quality and hydrological conditios at small sinking stream Trbuhovica. U: Brilly, M.; Šraj, M., ur., *XXIVth Conference of the Danubian Countries on the Hydrlogical Forecasting and Hydrological Bases of Water Management*. Ljubljana: Slovenian Natioanl Committee for the IHP UNESCO, str. 102-103.
- [111] Horvat, B.; Rubinić, J., 2008. Kvantifikacija komponenata bilance voda integracijom daljinskih istraživanja i hidrometrijskih mjerenja. U: Ožanić, N., ur., *Zbornik radova znanstvenog savjetovanja: Hidrološka mjerenja i obrada podataka*. Rijeka, Zagreb: Građevinski fakultet Rijeka, Hrvatsko hidrološko društvo, str. 269-280.
- [112] Rubinić, J.; Zwicker, G.; Dragičević, N., 2008. Doprinos poznavanju hidrologije Plitvičkih jezera – dinamika kolebanja razine jezera i značajne promjene. U: Ožanić, N., ur., *Zbornik radova znanstvenog savjetovanja: Hidrološka mjerenja i obrada podataka*. Rijeka, Zagreb: Građevinski fakultet Rijeka, Hrvatsko hidrološko društvo, str. 207-230.
- [113] Babić, S.; Rubinić, J.; Ožanić, N., 2007. Preispitivanje pristupa u rješenjima odvodnje prometnica. U: Raus, B., ur., *Četvrti hrvatski kongres o cestama: Cavtat Dubrovnik, Hrvatska, 28.-31. listopada 2007.: zbornik radova*. Zagreb: Hrvatsko društvo za ceste - Via vita, 2007.
- [114] Benac, Č.; Rubinić, J.; Ružić, I.; Celija, I., 2007. Geomorfološka evolucija riječnih ušća na istarskom poluotoku. U: Gereš, D., ur., *Hrvatske vode i Europska Unija - izazovi i mogućnosti: zbornik radova*, 4. hrvatska konferencija o vodama, Opatija, 17.-19. svibnja 2007.; Zagreb: Hrvatske vode, str. 273-280.
- [115] Ožanić, N.; Karleuša, B.; Rubinić, J.; Holjević, D., 2007. Posebnosti planiranja navodnjavanja u priobalnim područjima u Primorsko-goranskoj županiji. U: Gereš, D., ur., *Hrvatske vode i Europska Unija - izazovi i mogućnosti: zbornik radova*, 4. hrvatska konferencija o vodama, Opatija, 17.-19. svibnja 2007. Zagreb: Hrvatske vode, str. 607-616.

- [116] Rubinić, J.; Horvat, B.; Kuhta, M.; Stroj, A., 2007. Analiza izdašnosti priobalnih izvora na području opatije korištenjem termalnih infracrvenih satelitskih snimaka. U: Gereš, D., ur., *Hrvatske vode i Europska Unija - izazovi i mogućnosti: zbornik radova, 4. hrvatska konferencija o vodama, Opatija, 17.-19. svibnja 2007.* Zagreb: Hrvatske vode, str. 211-216.
- [117] Rubinić, J.; Travica, T.; Ružić, I.; Oštrić, M., 2007. Hidrologija krških priobalnih izvora s područja Novog Vinodolskog i Podvelebitskog primorja. U: Gereš, D., ur., *Hrvatske vode i Europska Unija - izazovi i mogućnosti: zbornik radova, 4. hrvatska konferencija o vodama, Opatija, 17.-19. svibnja 2007.* Zagreb: Hrvatske vode, str. 447-454.
- [118] Arbanas, Ž.; Benac, Č.; Rubinić, J., 2004. The geotechnical properties of the sediment body in the estuary of the Raša River, Croatia. U: Brebbia, C. A.; Saval Perez, J. M.; Garcia Andion, L.; Villacampa, Y., ur., *Coastal environment V, incorporating oil spill studies.* Southampton: WIT Press, str. 209-218.
- [119] Horvat, B.; Rubinić, J., 2003. Primjena GIS-okruženja na procjenu otjecanja. U: Gereš, D., ur., *Hrvatske vode u 21. stoljeću: zbornik radova, 3. hrvatska konferencija o vodama, Osijek, 28. - 31. svibnja 2003.* Zagreb: Hrvatske vode, str. 265-271.
- [120] Rubinić, J., 2003. Inženjerska obrada kratkotrajnih intenziteta oborina. U: Žugaj, R., ur., *Seminar Praktična hidrologija: zbornik radova: Zagreb, 20. i 21. ožujka 2003.* Zagreb: Hrvatsko hidrološko društvo, str. 20-37.
- [121] Rubinić, J.; Barbalić, D.; Ožanić, N., 2003. Analiza pristupa inženjerskoj obradi kratkotrajnih jakih kiša u Hrvatskoj na primjeru Pule. U: Gereš, D., ur., *Hrvatske vode u 21. stoljeću: zbornik radova, 3. hrvatska konferencija o vodama, Osijek, 28. - 31. svibnja 2003.* Zagreb: Hrvatske vode, str. 113-121.
- [122] Rubinić, J.; Matešić, L.; Holjević, D., 2003. A case history of sedimentation in Croatian North-Adriatic reservoirs. U: *Hydro 2003: proceedings, International Conference and exhibition, 3-6 November, 2003, Dubrovnik.* [S.l.]: Hydropower & Dams, Network events limited, Aqua-Media International.
- [123] Švonja, M.; Pavić, I.; Rubinić, J., 2003. Analiza kolebanja karakterističnih prosječnih protoka vodotoka Jadranskog sliva u Hrvatskoj. U: Gereš, D., ur., *Hrvatske vode u 21. stoljeću: zbornik radova, 3. hrvatska konferencija o vodama, Osijek, 28. - 31. svibnja 2003.* Zagreb: Hrvatske vode, str. 123-130.
- [124] Ožanić, N.; Rubinić, J., 2002. Problemi pojava velikih voda u urbanim sredinama. U: Žugaj, R., ur., *Okrugli stol Urbana hidrologija, Split, 25. i 26. travnja 2002.: zbornik radova.* Zagreb: Hrvatsko hidrološko društvo, 2002., str. 101-113.
- [125] Rubinić, J., 2002. Primjenjena hidrologija - Hidrologija akumulacijskih jezera. U: *Primjenjena hidrologija.* Zagreb: Društvo građevinskih inženjera Zagreb; Hrvatsko hidrološko društvo. Str. 5.1.-5.14.
- [126] Ožanić, N.; Rubinić, J.; Gereš, D., 2001. Zaštita voda u hrvatskom krškom području. U: Linić, A., ur., *Kako zaštititi vode Hrvatske s gledišta vodoopskrbe i odvodnje: znanstveno-stručni skup, 26.-30. lipnja 2001.* Zagreb: Hrvatska grupacija vodovoda i kanalizacije, 2001., str. 45-50.
- [127] Bušelić, G.; Rubinić, J.; Ožanić, N., 2000. Hidrološka analiza suspendiranog nanosa u gornjem dijelu sliva Kupe. U: Trninić, D., ur., *Okrugli stol Hidrologija i vodni resursi Save u novim uvjetima, Slavonski Brod, 7. i 8. studenoga 2000.: zbornik radova.* Zagreb: Hrvatsko hidrološko društvo; Hrvatsko društvo za odvodnju i navodnjavanje, str. 191-198.

- [128] Ožanić, N.; Rubinić, J., 1999. Vodni resursi izvorišta Gacka. U: Gereš, D., ur., *Hrvatske vode od Jadrana do Dunava: zbornik radova, 2. Hrvatska konferencija o vodama, Dubrovnik, 1999.* Zagreb: Hrvatske vode, 1999., str. 575-583.
- [129] Ožanić, N.; Rubinić, J., 1998. Problems in calculations of precipitation water drainage in urban areas. U: Braga, B., ur., *Proceedings of International workshop on non structural flood control in urban areas.* Sao Paolo: International Research and Training Center for Urban Drainage, str. 209-219.
- [130] Ožanić, N.; Rubinić, J.; Milković, J., 1998. Problemi urbane odvodnje pri pojavama ekstremnih oborina. U: Bajčić, A., ur., *Zbornik radova Znanstvenog skupa Andrija Mohorovičić 140. obljetnica rođenja.* Zagreb: Državni hidrometeorološki zavod, str. 417-425.
- [131] Rubinić, J.; Ožanić, N.; Bušelić, G.; Milković, J., 1998. Water temperature characteristics in the Kupa river catchment area. U: Gereš, D., *Proceedings, XIXth Conference of the Danube Countries on Hydrological Forecasting and Hydrological of Water Management, Osijek, 15. - 19. juni 1998.* Zagreb: Hrvatske vode, str. 667-674.
- [132] Ožanić, N.; Rubinić, J., 1996. Hidrološke osobitosti Vranskog jezera na otoku Cresu. U: Arko-Pijevac, M.; Kovačić, M.; Crnković, D., ur., *Zbornik radova znanstvenog savjetovanja Prirodoslovna istraživanja Riječkog područja.* Rijeka: Prirodoslovni muzej Rijeka, str. 22-25.
- [133] Juračić, M.; Sondi, I.; Rubinić, J.; Pravdić, V., 1995. Sedimentacija u neravnoteženom estuariju pod utjecajem rijeke: krški estuarij Raše (Hrvatska). U: Vlahović, I.; Velić, I.; Šparica, M., ur., *Zbornik radova 1. hrvatskog geološkog kongresa.* Zagreb: Institut za geološka istraživanja, str. 265-268.
- [134] Ožanić, N.; Rubinić, J., 1995. Hidrološki koncept funkcioniranja Vranskog jezera na otoku Cresu. U: Gereš, D., ur., *Zbornik radova 1. hrvatske konferencije o vodama.* Dubrovnik: JVP Hrvatska vodoprivreda, str. 159-167.
- [135] Rubinić, J.; Gajić-Čapka, M.; Milković, J.; Ožanić, N., 1995. Intenziteti oborine - problemi obrade i interpretacije u praksi. U: Bonacci, O.; Trninić, D., ur., *Zbornik radova okruglog stola - Uloga hidrologije u strukturi gospodarstva Hrvatske.* Zagreb: Hrvatsko hidrološko društvo, str. 53-69.
- [136] Rubinić, J.; Ožanić, N.; Breulj, D., 1995. Analiza upotrebe hidroloških proračuna u praksi projektiranja prometnica. U: Sršen, M. ur., *Prvi hrvatski kongres o cestama 1995., Opatija, 23. - 25. listopada: zbornik radova.* Zagreb: Hrvatsko društvo za ceste VIA-VITA, str. 189-193.
- [137] Rubinić, J., 1994. Hidrološka analiza bilansa i mutnoća vode izvora Rakonek. U: Makvić, Ž.; Vančina, F., ur., *Zbornik radova, Drugi stručni skup Sekcije za vodoopskrbu i odvodnju, Umag, 2. i 3. lipnja 1994.* Zagreb: Hrvatsko društvo za zaštitu voda i mora, str. 189-201.

Radovi u zbornicima skupova bez recenzije

- [138] Radišić, M.; Višković, N.; Rubinić, J. 2013. Primjena metoda strojnog učenja pri modeliranju dinamike kolebanja voda u kršu. U: Maričić, S., ur., *Georeks 2013.: zbornik radova: suvremene metode i alati u geotehnologiji, VII regionalni kongres studenata geotehnoških fakulteta, Osijek, 16.-18. svibnja 2013.* Osijek: Građevinski fakultet, 2013., str. 141-151.

- [139] Mance, D.; Lenac, D.; Hunjak, T.; Roller-Lutz, Z.; Rubinić, J., 2012. Određivanje porijekla i srednjeg vremena zadržavanja vode riječkih izvora pomoću stabilnih izotopa. U: Beslić, M.; Ban, D., ur., *Aktualna problematika u vodoopskrbi i odvodnji, Stručno-poslovni skup s međunarodnim sudjelovanjem, Bol, otok Brač, 24.-28. listopada 2012.* Ičići: Revelin, str. 63-71.
- [140] Krkač, M.; Rubinić, J.; Mihalić, S., 2012. Kostasjek landslide - Analyses of groundwater discharge as a basis for the new hydrological monitoring. U: Ožanić, N.; Arbanas, Ž.; Mihalić, S.; Marui, H.; Dragičević, N., ur., *2nd Project Workshop of the Croatia - Japan Project on Risk Identification and Land-use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia „Monitoring and analyses for disaster mitigation of landslides, debris flow and floods: Book of proceedings“.* Rijeka: University of Rijeka, str. 17-20.
- [141] Rubinić, J.; Zwicker, G., 2011. Hidrologija sustava Plitvičkih jezera i gornjeg toka Korane – praćenja, spoznaje i izazovi. U: Šutić, B.; Mataija, I.; Šikić, Z.; Dujmović, A.; Ružić, V.; Brozinčević, A., ur., *Zbornik radova znanstveno-stručnog skupa Nacionalnog parka Plitvička jezera,* str. 46-59.
- [142] Rubinić, J., 2004. Značajke malih voda i njihovo korištenje u krškim područjima. U: Žugaj, R., ur., *Seminar Velike i male vode, Zagreb, 1. i 2. travnja 2004.: zbornik radova.* Zagreb: Hrvatsko hidrološko društvo; Društvo građevinskih inženjera Zagreb, str. 179-203.
- [143] Rubinić, J.; Tomašić, M.; Ožanić, N.; Kukuljan, I., 1999. Hidrologija akumulacije Boljunčica u Istri. U: Gereš, D., ur., *Hrvatske vode od Jadrana do Dunava: zbornik radova, 2. Hrvatska konferencija o vodama, Dubrovnik.* Zagreb: Hrvatske vode, str. 597-604.
- [144] Ožanić, N.; Rubinić, J., 1998. Hidrološke značajke i režim funkcioniranja Vranskog jezera na otoku Cresu. U: Trninić, D., ur., *Okrugli stol Voda na hrvatskim otocima, Hvar, 1998. : zbornik radova.* Zagreb: Hrvatsko hidrološko društvo, str. 257-266.
- [145] Rubinić, J.; Ožanić, N., 1998. Hidrološke značajke vodnih pojava na sjeverno-jadranskim otocima. U: Trninić, D., ur., *Okrugli stol Voda na hrvatskim otocima, Hvar, 1998. : zbornik radova.* Zagreb: Hrvatsko hidrološko društvo, str. 243-255.
- [146] Rubinić, J.; Ožanić, N., 1996. Propisi za projektiranje vodnogospodarskih objekata. U: Simović, V., ur., *Graditeljstvo u obnovi i razvitku Republike Hrvatske: zbornik radova, Sabor hrvatskih graditelja 96, Cavtat, 1996.* Zagreb: Hrvatsko društvo građevinskih inženjera, str. 817-822.
- [147] Rubinić, J.; Ožanić, N., 1995. Hidrološki aspekti gospodarenja akumulacijom Botonega u Istri. U: Gereš, D., ur., *Održivi razvoj i upravljanje vodama: zbornik radova, 1. hrvatska konferencija o vodama, Dubrovnik, 24. - 27. svibnja 1995.* Zagreb: Hrvatska vodoprivreda, str. 147-157.
- [148] Rubinić, J.; Tomašić, M.; Kukuljan, I., 1995. Vodni potencijal jamskih prostora Labinštine. U: Vlahović, I.; Velić, I.; Šparica, M., ur., *Zbornik radova 1. hrvatski geološki kongres, Opatija, 18. - 21. 10. 1995.* Zagreb: Institut za geološka istraživanja, str. 519-522.
- [149] Ožanić, N.; Rubinić, J., 1994. Gospodarenje vodama Vranskog jezera na otoku Cresu - stanje i mogućnosti. U: Crnošija, G., ur., *Zbornik radova o strategiji održivog razvitka Hrvatskih otoka.* Hvar: Ministarstvo pomorstva, prometa i veza, str. 199-212.