

Sanja Kapelj – Janislav Kapelj – Mirjana Švonja

Hidrogeološka obilježja sliva Jadra i Žrnovnice

Sanja Kapelj
HR, 42000 Varaždin
Geotehnički fakultet
Varaždin
Hallerova aleja 7

Janislav Kapelj
HR, 10360 Sesvete –
Šimunčevac
Geo-Rudus
Đure Popovića 13

Mirjana Švonja
HR, 21000 Split
Hrvatske vode Split
Vukovarska 35

UDK: 556

Izvorni znanstveni članak
Priljeno: 8. kolovoza 2011.

Upravljanje zalihama podzemnih voda velikih krških slivova zahtijeva opsežnu i detaljnu karakterizaciju cijeloga hidrogeološkog sustava. U ovom je članku prikazan dio rezultata dobiven tijekom istraživanja između 2005. i 2009. godine. Jedan dio rezultata odnosi se na relevantne geološke, strukturne i hidrogeološke kriterije za određivanje mjesta pogodnih za motrenje količine i kakvoće podzemnih voda u priljevnom području izvora Jadra i Žrnovnice pomoću dubokih opažaćkih bušotina. Drugi rezultati razmatraju primjenu rezultata trasiranja i raspodjelu stabilnih izotopa kisika i vodika u izvorskim vodama Jadra i Žrnovnice kao i izvorskim vodama okolnih slivova rijeka Krke i Cetine pri odjeljivanju njihovih priljevnih područja. Dobivene spoznaje bit će vrlo korisne za daljnju zaštitu i upravljanje vrijednim zalihama podzemnih voda.

Ključne riječi: krš, podzemna voda, monitoring (motrenje), slivne odredbe, trasiranje, stabilni izotopi

UVOD

Krška područja Hrvatske obiluju zalihama podzemnih voda. Međutim, zbog specifičnih hidrogeoloških obilježja krša Dinarida podzemne vode iznimno su osjetljive na različite prirodne i antropogene utjecaje. Priljevno područje izvora Jadra i Žrnovnice jedno je od prostorno većih slivova Dinarida. Prema rezultatima dosadašnjih istraživanja, koja su bila pretežito usmjerena na proučavanje općih geoloških i hidrogeoloških obilježja područja te hidrološke izračune, procjenjena površina sliva iznosi između 250 i 500 km².¹ Kakvoća izvorske i riječne vode Jadra i Žrnovnice detaljno je istraživanja za potrebe odredbe indeksa kakvoće voda Dalmacije.²

Cijeli sliv izvora Jadra kao i istoimena rječica predstavljaju fenomen iznimne morfološke, pejzažne i fizionomske raznolikosti te bogatoga kulturnog, povijesnog i arheološkog nasljeđa. Jadro je tipična krška rijeka čiji vod-

ni potencijal dijelom potječe od podzemnoga dotoka iz okršenog podzemlja i površinskog dotoka s direktnog sliva. Izvire u podnožju jugozapadnih padina Mosora na visini oko 33,0 m nad morem (sl. 1). Cijelim svojim tokom ukupne dužine oko 4,2 km prolazi područjem grada Solina i na istočnom rubu Kaštelanskoga zaljeva ulazi u more. U samom središtu Solina rijeka Jadro se račva na glavno korito i više rukavaca koji se prije ušća u more opet spajaju u zajedničko korito. Najveći dio ove rijeke je reguliran.

Jadro prima bujične vode iz pet pritoka od kojih su najjači bujice Rupotina i Poklinovac. Dosadašnjim regulacijskim radovima na bujičnim pritocima i njihovim slivovima nije zaustavljena erozija zemljišta niti je bitnije smanjeno donošenje nanosa do rijeke Jadra.

Protoke Jadra značajno i brzo variraju ovisno o količini oborina na slivu. Najmanji izmjereni protok rijeke Jadra

1 O. Bonacci – M. Kerovec – T. Roje-Bonacci – N. Štambuk-Giljanović 1995; O. Bonacci – T. Roje-Bonacci 1996; V. Denić-Jukić – D. Jukić 2002; F. Fritz 1979; S. Kapelj – J. Kapelj – D. Jukić – V. Denić-Jukić 2008; F. Fritz – A. Pavičić – A. Renić – J. Kapelj 1988; F. Fritz – J. Kapelj 1998.

2 N. Štambuk-Giljanović 2006.



Slika 1.
Izvor Jadra

kod Vidovića mosta (Majdan) iznosi $0,22 \text{ m}^3/\text{s}$ (16. studenoga 1985.), maksimalni izmjereni protok $78,1 \text{ m}^3/\text{s}$ (13. studenoga 1997.), a srednji godišnji protok $9,7 \text{ m}^3/\text{s}$. Srednji mjesečni protok rijeke Jadra kod Vidovića mosta je najmanji u kolovozu i rujnu kada se može dogoditi da padne i do $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (2000. i 2003.). Izvor Jadra se koristi za vodoopskrbu gradova Splita, Solina, Kaštela i Trogira s nizom prigradskih i okolnih naselja.³

Najveći potrošač izvorske vode Jadra je grad Split do kojega se voda doprema kroz dva paralelna kanala: stari Dioklecijanov kanal propusne moći 550-880 l/s i novi betonski kanal kapaciteta 2000 l/s u gornjem i 1350 l/s u donjem dijelu. Stari Dioklecijanov kanal je nastao još u doba Rimskoga Carstva prije 1700 godina. Kanal je širok 60 cm, visok 120 cm i dugačak oko 9 km. Danas se koristi samo dio kanala do crpne stanice Kopilica, dužine 7450 m, koji je detaljno rekonstruiran. Na crpnim stanicama Ravne njive i Kopilica dospjela voda s izvora Jadro se tlači u pripadajuće glavne gradske vodopreme.

Minimalna izdašnost samoga izvora Jadra kreće se između $3,60 \text{ m}^3/\text{s}$ (kolovoz 1995.) i $3,90 \text{ m}^3/\text{s}$ (rujan 1997. te kolovoz i rujan 2003.). Izdašnost izvora Jadra najmanja je u sušnom razdoblju i to uglavnom u kolovozu i rujnu kada srednji mjesečni protok može pasti na svega $4,0 \text{ m}^3/\text{s}$ (kolovoz 1995. i rujan 2003.). U sušnom razdoblju zahvaćanje vode s izvora Jadra za potrebe vodoopskrbe najčešće poraste zbog pojačane potrošnje pa se umjesto dopuštenih $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$ tada uzima i do $2,9 \text{ m}^3/\text{s}$.⁴

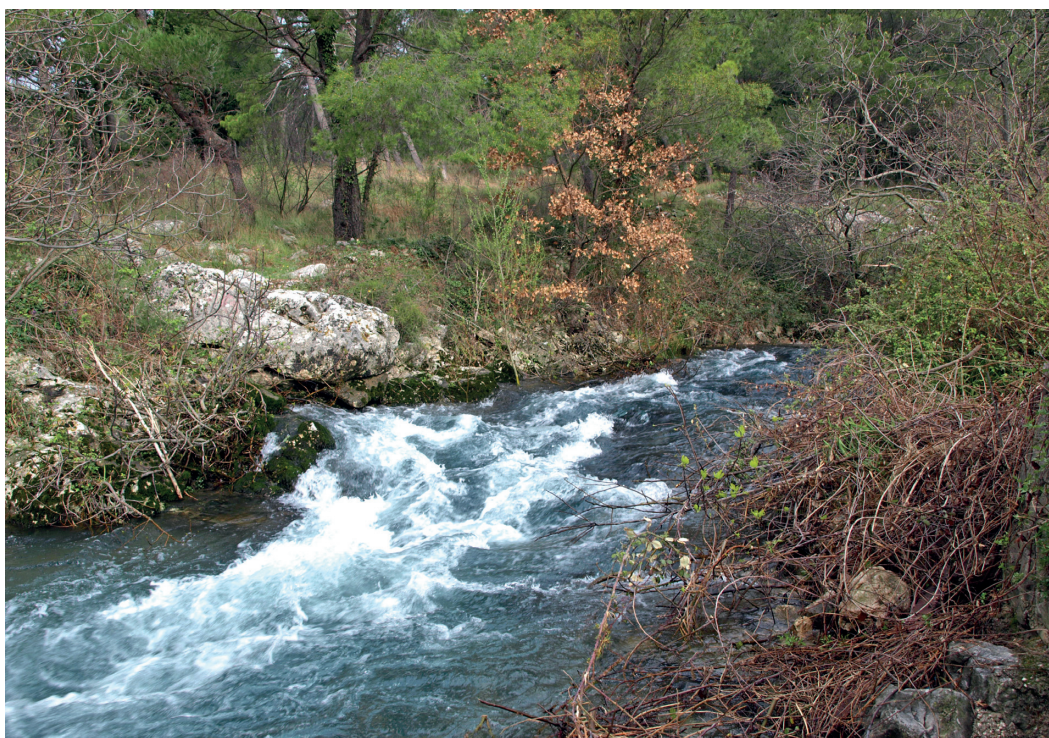
Prema pokazateljima kakvoće rijeka Jadro pripada prvoj kategoriji voda na cijelom toku od izvora do vodnih pragova nizvodno od središnjega dijela grada. Nizvodni dio rijeke, koji je pod utjecajem mora, i ušće pripadaju drugoj kategoriji voda.⁵

Izvorište Žrnovnice se sastoji od nekoliko manjih izvora koji se javljaju na širem području u visinskom rasponu od 77,0 do 90,0 m nad morem (sl. 2). Izvorišne vode se djelomično koriste za vodoopskrbu naselja Žrnovnice i za navodnjavanje okolnoga poljoprivrednog zemljišta. Minimal-

3 S. Kapelj – J. Kapelj – E. Prelogović – T. Marjanac 2006.

4 Isto.

5 N. Štambuk-Giljanović 2006.



Slika 2.
Izvorište Žrnovnice – jedno od manjih mjesta istjecanja

na izmjerena izdašnost ovoga izvorišta iznosi 250 l/s (9. rujna 1993.), a maksimalna 19,1 m³/s (18. prosinca 2004.).⁶

Rijeka Žrnovnica ima nekoliko bujičnih pritoka koji su uglavnom suhi veći dio godine. Ukupna dužina Žrnovnice od izvora do ušća u more u Stobrečkoj uvali iznosi oko 4,5 km. Protoke joj značajno i brzo variraju ovisno o količini oborina na slivu. Najveći izmjereni protok u koritu rijeke Žrnovnice (kod postaje Laboratorij) iznosi 58,4 m³/s (18. prosinca 2004.), najmanji protok oko 200 l/s (1. rujna 1993.), a srednji godišnji protok 1,8 m³/s. Srednji mjesečni protoci rijeke Žrnovnice su najmanji u srpnju i kolovozu (na izvoru iznose 0,61 – 0,58 m³/s, a kod Laboratorija 0,52 – 0,48 m³/s).⁷

Unatoč činjenici da je izvor Jadra jedino izvorište pitke vode za više od 300.000 stanovnika, motrenje količine i kakvoće vode do sada se provodilo samo na mjestima istjecanja podzemne vode, dakle na samom području vodozahvata. Razine podzemnih voda u priljevnom području izvora uvijek su se procjenjivale na temelju usporedbe s fluktuacijama razina podzemnih voda u priljevnim područjima pojedinih akumulacija voda u dalmatin-

skom kršu. S obzirom na pretpostavljenu veliku površinu sliva i sve očekivane antropogene utjecaje uzrokovane izgradnjom ili planiranjem poslovnih zona u slivu, pokazala se potreba za puno egzaktnijim i učinkovitijim pristupom zaštiti tako vrijednih zaliha podzemne vode.

Zbog toga se godine 2005. pristupilo vrlo detaljnim studijskim interdisciplinarnim istraživanjima usmjerenim na osnovni cilj – uspostavu smjernica za upravljanje količinom i kakvoćom podzemne vode. Osnovne spoznaje prijašnjih istraživanja najprije su analizirane, sažete i uspoređene s novim podacima geoloških, morfoloških, strukturnih, hidroloških i hidrogeoloških istraživanja, poglavito s rezultatima trasiranja podzemnih tokova i s izotopno-geokemijskim istraživanjima. Strukturne, morfološke i hidrogeološke analize prostora sliva pridonijele su i dizajnu slojeva za daljnje modeliranje i ocjenu ranjivosti i rizika za podzemne vode. Svi podaci su zabilježeni u prethodno strukturirane baze podataka.

Za odjeljivanje velikih slivova u krškim područjima uvijek su potrebna složena i detaljna istraživanja. U većini

⁶ S. Kapelj – J. Kapelj – E. Prelogović – T. Marjanac 2006.

⁷ Isto.

slučajeva prilično ujednačen litološki sastav u kombinaciji sa složenim morfološkim, geološkim i strukturnim odnosima otvara dileme o porijeklu podzemne vode, uvjetima napajanja, području rasprostiranja, geometriji i veličini podzemnoga okršenog prostora (krškoga vodonosnika), količini uskladištenih vodnih zaliha i njegovoj povezanosti s drugim vodonosnicima, rijekama, jezerima ili morem.

Osnovne spoznaje o hidrogeološkim obilježjima pojedinih slivova obično su dobivene klasičnim geološkim, strukturnim, hidrogeološkim i hidrološkim istraživanjima. Pokusi trasiranja podzemnih tokova sastavni su dio klasičnoga pristupa koji podrazumijeva ispitivanje međusobne povezanosti između dvaju ili više vodnih objekata na nekom prostoru. Obično je početna točka mjesto ubacivanja trasera, a to može biti ponor, bušotina ili jama, dok su mjesta motrenja pojave trasera odabrana mjesta istjecanja, izvori ili zone izviranja za koje postoje geološke, hidrogeološke i strukturno utemeljene pretpostavke o podzemnoj povezanosti s mjestom ubacivanja trasera. Ovim postupkom dobivaju se podaci o međusobnoj točkastoj povezanosti duž više-manje privilegiranih podzemnih puteva, a temeljem oblika krivulje istjecanja trasera i podaci o hidrodinamičkim uvjetima koji prevladavaju u vodonosniku te o disperziji i pronosu trasera. Najvažniji podaci dobiveni trasiranjem su oni o prividnoj brzini podzemnih tokova što je vrlo važan podatak za određivanje zona sanitarne zaštite izvorišta. Međutim, hidrogeološka obilježja velikih krških slivova poput sliva Jadra i Žrnovnice ne mogu u svakom svom dijelu biti analizirani samo na osnovu trasiranja jer su to samo podaci koji povezuju pojedine točke u prostoru.

Korištenje raspodjele prirodnih trasera u podzemnim vodama – hidrogeokemijskih, koji ovisе o litološkom sastavu stijena vodonosnika, i izotopnih, koji su sastavni dio molekule vode ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$) – posljednjih tridesetak godina pokazalo je svoje prednosti upravo pri utvrđivanju porijekla voda i područja pretežitoga napajanja pojedinih izvorišta.⁸ Poznavanje njihove raspodjele u nekom slivu i vremenskih varijacija omogućava dobru interpretaciju porijekla voda i pretežitoga područja napajanja. U ovom članku dobiveni rezultati izotopnih mjerenja korišteni su za određivanje prekograničnog karaktera sliva.⁹

GEOLOŠKA I HIDROGEOLOŠKA OBILJEŽJA SLIVA

Na području sliva izvora Jadra i Žrnovnice zastupljene su stijene vapnenci, dolomiti i laporoviti vapnenci mezozojske, eocenske starosti te prostorno vrlo male raspro-

stranjenosti – vapnenci perma. Klastične naslage u slivu su fliške naslage eocena, klastiti trijasa i paleocenski lapori. Stratigrafski najmlađe naslage su kvartarni deluvijalni sedimenti krških polja, pretežito siltozno-pjeskovitoga sastava s različitim udjelom ulomaka kršja karbonatnih stijena.

Izvori Jadra i Žrnovnice smješteni su u podnožju Mosora (1300 m nadmorske visine) i Kozjaka (600 m nadmorske visine). Izvor Jadra nalazi se na 33 m nadmorske visine, a izvorište Žrnovnice s više mjesta istjecanja na 77 do 90 m nadmorske visine, u zoni dodira karbonatnih naslaga splitske Zagore i obalnoga fliškog pojasa. U morfološkom smislu jasno je uočljiva pojava izrazito raščlanjenog reljefa, posebno u području rasprostranjenja karbonatnih stijena. Između niza vrhova kojima koji su nadmorske visine od 550 do 680 m nalazi se više krških polja, uvala i zaravni na nadmorskim visinama od 300 – 350 m. Najveća krška polja su Mučko polje (cca 400 ha), Dicmansko polje (cca 300 ha), Dugopolje (cca 190 ha) i Konjsko polje (cca 150 ha). Nizovi uzdignuća i depresija u sjeverozapadnom dijelu razmatranog područja imaju pravac pružanja sjeverozapad-jugoistok (tzv. pravac dinarskog pružanja), dok idući prema istoku orijentacija morfoloških cjelina postupno prelazi u pravac istok-zapad (tzv. hvarsko pružanje). Morfološki uzdignute dijelove reljefa izgrađuju isključivo čvrste karbonatne stijene (vapnenci i dolomiti) u kojima su zastupljeni svi elementi krške morfologije, kao što su povremeni ponori, jame, spilje, vrtače, škrape, suhe doline, pojave strmo odsječenih padina itd. U morfološkim depresijama koje uglavnom izgrađuju klastične prašinsto glinovite naslage različite vrste i starosti mogu se uočiti manji terasni odsjeci, zatim pojave povremenih tokova i ponora, posebno u rubnim dijelovima polja. Također su karakteristična i brojna sufozijska uleknuća u klastičnim naslagama krških polja.

Vapnenci mezozoika i eocena su uglavnom dobro propusne stijene i imaju funkciju vodonosnika. Ovisno o zastupljenosti dolomitne i laporovite komponente smanjuje se propusnost vapnenaca u srednje propusne do slabo propusne stijene. Klastične naslage eocenskoga fliša, klastiti trijasa i paleocenski lapori su nepropusne stijene pa imaju funkciju potpunih ili relativnih hidrogeoloških barijera ovisno o njihovu prostornom položaju. Potpune hidrogeološke barijere usmjeravaju tokove podzemne vode, a ispod relativnih barijera podzemne vode nesmetano teku. Propusnost deluvijalnih sedimenata krških polja ovisi o njihovom pretežitom granulometrijskom sa-

8 S. Kapelj – T. Marković – J. Kapelj – J. Terzić 2002.

9 S. Kapelj – J. Kapelj – E. Prelogović – T. Marjanac 2006.

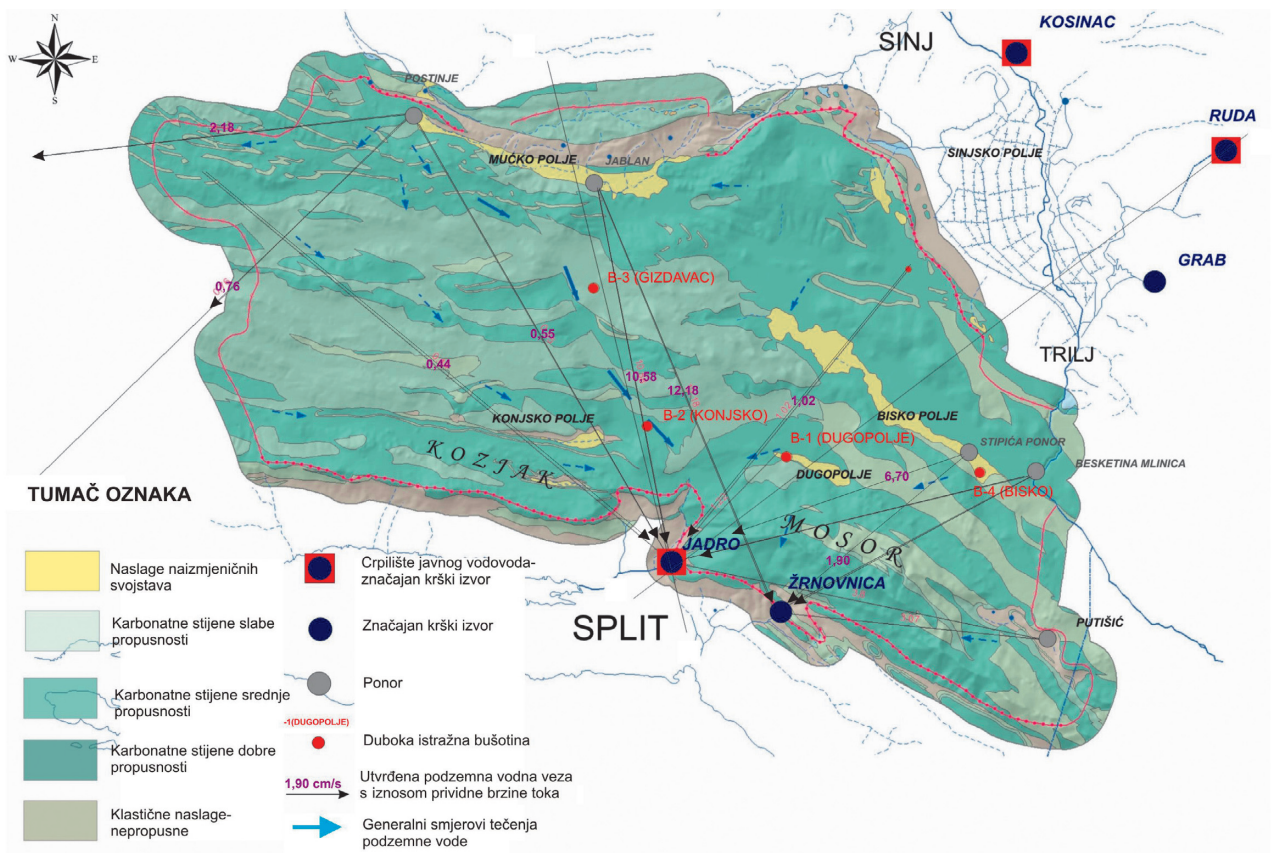
stavu, odnosno udjelu krupnozrnatih i sitnozrnatih čestica, fragmenata stijena i sadržaju glinovite komponente. Stoga zbog lateralne i vertikalne nehomogenosti sedimente krških polja u hidrogeološkom smislu smatramo propusnim naslagama (sl. 3).

Područje sliva Jadra i Žrnovnice odlikuje se naglašenom razlomljenošću i tektonskom aktivnošću. Na potonje izravno upućuje stalno pojavljivanje potresa. Tektonska aktivnost rezultira i promjenama strukturnih odnosa, osobito sustava rasjeda i pukotina. Zbog primarne važnosti određivanja recentnih geoloških strukturnih odnosa detaljno je razrađen strukturni sklop te prikazani podaci koji ukazuju na pomake struktura, aktivne rasjede i posebice sustave važne za moguću cirkulaciju podzemne vode. Tektonski su najaktivnije dionice rasjeda poprečnoga ili gotovo poprečnoga pružanja prema orijentaciji kompresijskoga stresa. Ovom prilikom na shematskom prikazu hidrogeološke karte sliva strukturni elementi su izostavljeni zbog bolje preglednosti područja i rezultata istraživanja.

TRASIRANJE PODZEMNIH TOKOVA

Poznavanje podzemnih vodnih veza i prividnih brzina podzemnih tokova u kršu ima nekoliko primjena. Najvažnije je određivanje hidrogeoloških granica sliva, što je najčešće potrebno za određivanje zona sanitarne zaštite izvora pitke vode.

U slivu Jadra i Žrnovnice do sada je provedeno osam trasiranja, a izvan sliva relevantno trasiranje izvedeno je na području sliva rijeke Krke. Dva trasiranja su bila regionalnoga karaktera, jedno iz istočnoga te jedno iz sjevernoga rubnog dijela sliva. Izvedeno trasiranje izvan samoga razmatranog sliva, kod Kljaka u slivu rijeke Krke, obuhvatilo je i opažanje izvora Jadra i Žrnovnice i Pantana. Jedno trasiranje za potrebe hidrogeoloških istraživanja za određivanje upojnoga mjesta za oborinske vode izvedeno je na području poslovne zone Podi na Dugopolju. Dva trasiranja provedena su za potrebe Studije utjecaja na okoliš Centra za gospodarenje komunalnim i neopasnim otpadom Splitsko-dalmatinske županije na prosto-



Slika 3. Shematska hidrogeološka karta priljevnoga područja izvora Jadra i Žrnovnice bez strukturnih elemenata (S. Kapelj – J. Kapelj – D. Jukić – V. Denić-Jukić 2008.)

ru Lečevice. Trasiranja su se provodila prema sljedećem redosljedu (sl. 3):

1. Prvo trasiranje provedeno je 11. rujna 1963. ubacivanjem trasera (natrijeva fluoresceina) u ponor kod Grabova mlina u dolini rijeke Cetine u koji voda ponire u sušnom razdoblju. Tim trasiranjem dokazana je vodna veza ovog dijela terena s izvorima Jadro i Žrnovnica. Trasiranje je provedeno u sklopu izrade projektne dokumentacije za HE Đale i detaljnije je opisano u elaboratu Geotehnike godine 1975. Međutim, rezultati trasiranja su preuzeti iz Hidrogeološke studije općine Split¹⁰ jer izvorni elaborat ne posjedujemo.
2. Trasiranje izvedeno 14. siječnja 1978. iz ponora Jablan u Mučkom polju u okviru izrade Hidrogeološke studije općine Split.¹¹ Ubačeno je 120 kg natrijeva fluoresceina, a u ponor je utjecao tok vode izdašnosti oko 300 l/s. Pojava boje je registrirana na izvorima Jadra i Žrnovnice s vrlo velikim prividnim brzinama od 10,58 cm/s (Jadro) i 12,18 cm/s (Žrnovnica).
3. Trasiranje ponora Čulina mlinica kod Kljaka provedeno je 24. listopada 1990. u sklopu radova za Osnovnu hidrogeološku kartu, list Drniš.¹² U vrijeme trasiranja u ponor je poniralo oko 5 l/s vode. Ubačeno je 100 kg natrijeva fluoresceina. Trasiranje je izvedeno nakon dugoga sušnog razdoblja neposredno prije prognozirane kiše. Opažanja su vršena na izvorima Torak, Jaruga, Ribnik, Pantan, Jadro i Žrnovnica. Rezultati provedenoga trasiranja u vrijeme hidrološki niskih voda pokazuju sigurnu i izravnu vezu ponora s izvorom Torak i znatno slabiju s izvorom Jaruga. Prividne brzine tečenja podzemnih voda su vrlo male te iznose 0,77 cm/s (Torak) i 0,71 cm/s (Jaruga).
4. Trasiranje provedeno 28. ožujka 1992. iz ponora Ponikve u Strijanskom polju kod Putišića bilo je za potrebe određivanja zona sanitarne zaštite crpilišta Studenci.¹³ Ustanovljena je pojava trasera na Žrnovnici i Jadru uz prividne brzine podzemnog tečenja 3,07 odnosno 3,80 cm/s, što upućuje da ove dijelove terena treba štiti mjerama zaštite predviđenim za treću zonu.
5. Trasiranje toka podzemne vode iz Colića ponora u Dugopolju provedeno je 12. veljače 2004. za potrebe idejnoga rješenja dispozicije oborinskih voda s područja Poslovno-građevinske zone Podi-Krč.¹⁴ Pojava trasera opažala se na izvorima Jadra i Žrnovnice, međutim dokazana je veza ponora samo s izvorom Jadra uz prividnu brzinu podzemnog tečenja 1,22 cm/s. Prema tome ponor i njegova okolica s poslovnom zonom pripadaju trećoj zoni sanitarne zaštite izvora Jadra.
6. Trasiranje bušotine B-2 na području Kladnjica za potrebe istraživanja lokacije Centra za gospodarenje komunalnim i neopasnim industrijskim otpadom za Splitsko-dalmatinsku županiju izvedeno je 16. kolovoza 2004. u hidrološki sušnom razdoblju.¹⁵ Pojava boje opažala se do sredine prosinca 2004. na izvorima Jadra, Žrnovnice, Rupotine, Tupinoloma, Raduna i Pantana. Nakon četiri mjeseca opažanja boja se nije pojavila ni na jednom od spomenutih izvora.
7. Tijekom godine 2006. za potrebe daljnjih hidrogeoloških istraživanja na području predložene lokacije Centra za gospodarenje komunalnim i neopasnim otpadom za Splitsko-dalmatinsku županiju izvedeno je trasiranje iz speleološkoga objekta – prirodne jame na području Kladnjica – dubine 32 m, a ubačeno je 60 kg natrijeva fluoresceina.¹⁶ U opažanje su bili uključeni izvori Žrnovnica, Jadro, Tupinolom, Fuležina, Pantan, Marina, Ribnik, Jaruga I, Jaruga II, Torak i Gospa Stomorija. Boja je registrirana samo na izvoru Jadra, 66 dana i 20 sati nakon ubacivanja trasera, a prividna brzina toka podzemne vode iznosila je 0,44 cm/s.
8. U dijelu najnovijih istraživanja pristupilo se trasiranju ponora u Postinju.¹⁷ Nakon vrlo detaljnoga čišćenja ponora od klastičnog nanosa trasiranje je provedeno 8. veljače 2008. ubacivanjem 100 kg natrijeva fluoresceina i njegovim ispiranjem s više od 520 m³ vode iz hidrantske mreže u kontinuiranom vremenskom slijedu od 24 sata. Pokus je proveden u uvjetima srednje visokih voda. Iz dijagrama istjecanja na Jadru (gdje postoje pouzdani mjereni po-

10 F. Fritz 1979.

11 Isto.

12 F. Fritz 1990.

13 A. Renić 1992.

14 J. Kapelj – S. Kapelj 2004.

15 M. Oluić – R. Vasiljević – S. Burela 2004.

16 T. Korbar – L. Fuček – D. Palenik – D. Matičec – M. Kuhta – A. Stroj 2006.

17 S. Kapelj – J. Kapelj – D. Jukić – V. Denić-Jukić 2008.

daci o protoku) vidi se da je tijekom pokusa izdašnost Jadra bila u kontinuiranom porastu i da je u trenutku pojave boje dosegla 28 m³/s. Traser se najprije pojavio nakon 19 dana na izvoru Ribnik u Morinjskom zaljevu. Pri tome je registrirana prividna brzina podzemnog tečenja od 2,179 cm/s. Traser je istjecao u razrjeđenju koje nije bilo vidljivo golim okom. Sljedeća pojava boje registrirana je na izvoru Jadra 23. ožujka 2008. s prividnom brzinom tečenja 0,553 cm/s. Četiri dana kasnije, 27. ožujka, pojava trasera je registrirana na izvoru Mandrača u Marini s prividnom brzinom podzemnog tečenja 0,759 cm/s. Tijekom toga pokusa pojava trasera nije registrirana na ostalim vodnim objektima na kojima je provedeno uzorkovanje (izvori Čikole, Torak, Jaruga, Pantan, Grebaštica, Žrnovnica).

9. Trasiranje ponora u Biskom polju provedeno je 15. siječnja 2010. ubacivanjem 50 kg natrijeva fluoresceina i njegovim kontinuiranim ispiranjem prirodnim površinskim tokom procijenjene izdašnosti od 150-200 l/s.¹⁸ Ova izdašnost je nakon 12 sati opala na oko 10%. Traser se pojavio samo na izvorima Jadra i Žrnovnice, a na izvorištu Studenci u slivu Cetine i rijeci Cetini na mostu kod Blata traser se nije pojavio niti u tragovima. Pokus je proveden u uvjetima visokih voda. U spomenutim hidrološkim uvjetima izmjerene prividne brzine upućuju na privilegiran tok iznimne brzine prema izvoru Jadra (oko 6,7 cm/s) uz visok pronos od oko 80% trasera. Što se tiče izvora Žrnovnice, registrirana prividna brzina je znatno niža (oko 1,9 cm/s), što je relativno sporo s obzirom na hidrološke uvjete u kojima je pokus proveden. To je u potpunosti u skladu s do sada registriranim prividnim brzinama tečenja u slivu Jadra i Žrnovnice. Na temelju prikupljenih podataka i rezultata može se zaključiti da krajnji istočni dio Biskoga polja pripada slivu Jadra i Žrnovnice, a ne slivu rijeke Cetine.

LOCIRANJE OPAŽAČKO-PIEZOMETARSKIH BUŠOTINA (BUŠOTINA ZA MOTRENJE)

Strukturna analiza i hidrogeološke funkcije stijena korištene su za karakterizaciju mreže podzemnoga tečenja unutar priljevnoga područja. U skladu s provedenom geološkom karakterizacijom prostora i rezultatima trasiranja podzemnih tokova na četiri mjesta u različitim di-

jelovima sliva odabrana su perspektivna područja za lociranje četiri istražno-piezometarske bušotine namijenjene motrenju razine i kakvoće podzemnih voda. Na svakom odabranom mjestu, Dugopolju, Gizdavcu, Konjskom i Biskom polju, nakon provedenih geofizičkih istraživanja detaljno su locirana mjesta za izvedbu istražno opažaćkih bušotina (sl. 4).¹⁹

Dvije lokacije, Gizdovac (B-3; 350 m dubine) i Konjsko (B-2; 300 m dubine), odabrane su duž transverzalne rasjedne zone Muć – Gizdovac – Prugovo – Konjsko – Klis koja je dokazano trasiranjem ponora u Mučkom polju i najbrža podzemna vodna veza prema izvorima Jadra i Žrnovnice. To je ujedno i područje koncentriranja svih doprinosa iz zapadnih i sjeverozapadnih dijelova sliva. Treća istražno-opažaćka bušotina locirana je na Biskom polju (B-4; 300 m dubine) na križanju dviju rasjednih zona. To područje perspektivno je za motrenje razine i kakvoće podzemnih voda koje vjerojatno dotječu iz sliva rijeke Cetine.

Budući da je područje općine Dugopolje na relativno maloj udaljenosti od izvorišta, a posljednjih godina je naglo urbanizirano izgradnjom poslovne zone i pratećih sportskih objekata, štiti se drugom zonom sanitarne zaštite. Stoga je i jedna istražno-opažaćka bušotina (B-1), dubine 300 m, locirana na području gdje se očekuje antropogeni utjecaj na podzemnu vodu

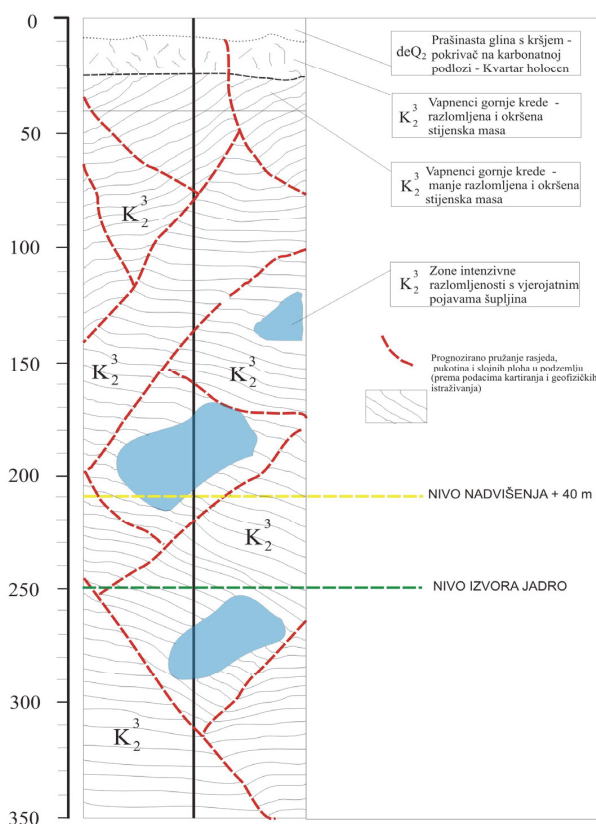
Do danas su na tri lokacije (Dugopolje, Gizdovac i Bisko polje) izvedene bušotine, a dvije su u potpunosti opremljene instrumentima za kontinuirano motrenje razine podzemne vode, temperature, električne vodljivosti i mutnoće (Dugopolje, Gizdovac). Ugrađena je uranjajuća crpka za povremeno uzimanje uzoraka za analizu kakvoće podzemne vode.

HIDROKEMIJSKA I IZOTOPNA ISTRAŽIVANJA Tehnike i metode mjerenja

Tijekom dvije godine u mjesečnim intervalima prikupljali su se uzorci za hidrokemijske i izotopne analize na izvorima Jadra i Žrnovnice. Istovremeno su se uzimali uzorci i na devet izvora susjednih slivova rijeke Krke, Cetine i priobalnoga vodonosnika izvora Pantan. Kompozitni mjesečni uzorci za izotopne analize prikupljeni su na meteorološkoj stanici Dugopolje. Dobiveni podaci pružili su nam dodatne informacije za odjeljivanje slivova na istraživanom prostoru. Za određivanje hidrokemijskih pokazatelja u Laboratoriju za geokemiju okoliša Geotehničkoga fakulteta korištene su konvencionalne tehnike i

18. S. Kapelj – J. Kapelj – I. Hip – J. Loborec – D. Dogančić 2009.

19. S. Kapelj – J. Kapelj – E. Prelogović – T. Marjanac 2006.



Slika 4.
Pretpostavljani profil istražno-piezometarske bušotine u Dugopolju

metode, titriranje, UV-VIS spektrofotometrija i AAS spektrometrija.

Sastav stabilnih izotopa u uzorcima oborina i voda mjereno je tehnikom masene spektrometrije u Institutu za upravljanje vodnim zalihama Joanneum istraživačkog instituta u Grazu u Austriji.

Rezultati se prikazuju u δ vrijednostima, u promilima (‰) odstupanja vrijednosti u uzorku od onoga u međunarodnom standardu SMOW (engl. Standard Mean Ocean Water) koji je zapravo izotopni omjer koji postoji u ocenaskoj vodi na dubinama većim od 40 m. Uobičajeni način izračuna je pomoću sljedeće relacije:

$$\delta (\text{‰}) = (R_{\text{uzorak}} - R_{\text{SMOW}}) / R_{\text{SMOW}} \times 1000$$

gdje je R_{uzorak} omjer stabilnih izotopa u uzorku, a R_{SMOW} je omjer u standardu oceanske vode. Mjerna reproduciбилnost je bila bolja od $\pm 0.1\text{‰}$ za $\delta^{18}\text{O}$ i $\pm 1\text{‰}$ za δD .

Hidrogeokemijski facijes

Izvorske vode Jadra i Žrnovnice, kao i vode susjednih slivova rijeka Krke i Cetine, geokemijski pripadaju Ca-HCO_3 do CaMg-HCO_3 tipu vode (Studenci, Jaruga, rijeka Cetina, izvori Grab i Ruda). Iznimka su vode izvora Jaruge i Pantana budući da Jaruga sadrži povišene koncentracije sulfata zbog naslaga sulfatnih minerala, gipsa i anhidrita u stijenama vodonosnika, a izvor Pantan je uglavnom pod utjecajem zone miješanja s morskom vodom pa je izvorska voda bočata. Na izvoru Pantan tijekom hidrološki viših voda doprinos podzemnih voda raste i smanjuje se salinitet pri čemu se geokemijski tip izvorske vode mijenja iz $\text{Na-ClSO}_4\text{HCO}_3$ tipa u $\text{NaCaMg-HCO}_3\text{SO}_4\text{Cl}$ geokemijski tip.²⁰

Porijeklo izvorskih voda Jadra i Žrnovnice

Poznavanje omjera stabilnih izotopa kisika i vodika u istraživanju krških hidrogeoloških sustava koristi se obično za utvrđivanje porijekla voda, područja prihranjivanja i ispitivanja hidrodinamičkih uvjeta koji vladaju u vodonosnicima. Varijacije njihova omjera u podzemnim vodama odraz su promjene godišnjih doba, nadmorskih visina područja napajanja, blizine mora i izotopnih izmjena sa stijenskom masom. Ustanovljena linearna zavisnost između sadržaja stabilnih izotopa kisika i vodika u oborinama omogućava bolju ocjenu porijekla voda.

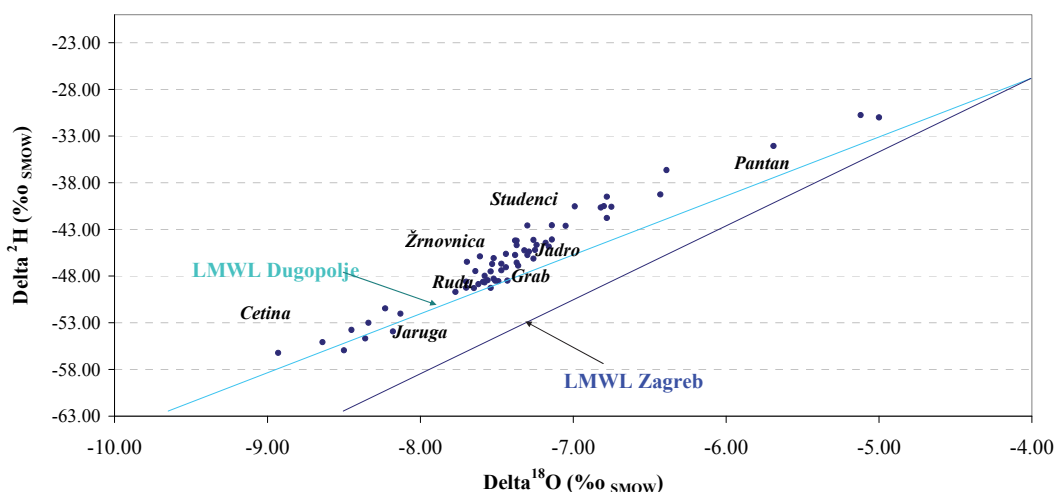
Udaljavanjem od utjecaja mora i sniženjem nadmorske visine područja pretežitoga napajanja u izvorskim vodama se smanjuje udio težih izotopa. Male varijacije tijekom promatranog razdoblja na pojedinim izvorima odražavaju mogućnost dobre homogenizacije svakoga novog doprinosa s već postojećom podzemnom vodom, a velike su odraz pretežito kanalnoga tipa tečenja i povremenoga karaktera izvora (sl. 5).²¹

Korištenje izotopnih trasera polučilo je nove spoznaje o porijeklu podzemne vode i načinu napajanja izvora Jadra i Žrnovnice. Dobiveni rezultati potvrdili su prijašnje hipoteze o porijeklu podzemne vode Jadra i Žrnovnice kao i veličini priljevnoga područja duž istočnoga dijela granice sliva.

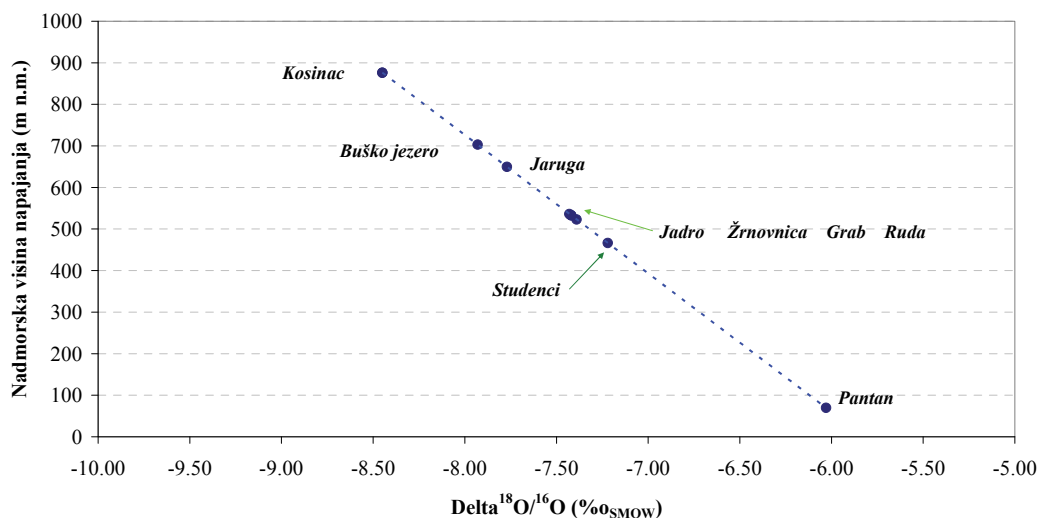
Na nekom području se već uporabom izotopnoga gradijenta s obzirom na nadmorsku visinu može dobro procijeniti područje pretežitoga napajanja pojedinih izvora.

20 S. Kapelj – J. Kapelj – D. Jukić – V. Denić-Jukić 2008.

21 E. Mazor 2004.



Slika 5.
 Odnos $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ vrijednosti u izvorskim vodama Jadra i Žrnovnice i izvorima susjednih slivova



Slika 6.
 Odnos između $\delta^{18}\text{O}$ vrijednosti i izračunatih nadmorskih visina pretežitoga područja napajanja

Izotopni gradijent dobiva se najčešće mjerenjem sadržaja stabilnih izotopa kisika i vodika u oborinskim vodama koje se prikupljaju na meteorološkim stanicama koje se nalaze na različitim nadmorskim visinama.

Za referentnu nadmorsku visinu obično se uzima podzemna ili površinska voda iz priljevnoga područja s manjim i strogo određenim priljevnim područjem. U našem slučaju kao referentno mjesto uzet je izvor Grab u slivu ri-

jeke Cetine jer ima dobro definiran sliv s vrlo ujednačenim izotopnim sadržajem tijekom hidrološke godine.

Varijacije izotopnoga gradijenta na području jadranskoga priobalja nalaze se između 0,2 i 0,4 ‰ na 100 m. Za primjer uzeta je vrijednost izotopnog gradijenta od 0,3 ‰ na 100 m, a izračunate vrijednosti prikazane su na slici.²²

Iz spomenutoga prilično se pouzdano može potvrditi da nekoliko izvora u slivu Cetine, izvori Grab i Ruda dijele

22. I. Krajcar Bronić – N. Horvatinčić – J. Barešić – B. Obelić – P. Vreča 2004.

isto priljevno područje s Jadrom i Žrnovnicom. Budući da spomenuti izvori imaju velik dio sliva u susjednoj državi, Republici Bosni i Hercegovini, sliv Jadra i Žrnovnice može se stoga smatrati prekograničnim vodonosnikom (sl. 6).

ZAKLJUČAK

Na temelju rezultata geološko-strukturne i hidrogeološke karakterizacije prostora te rezultatima provedenih trasiranja podzemnih tokova, na četiri mjesta u različitim dijelovima sliva odabrana su perspektivna područja za lociranje četiri opažačko-piezometarske bušotine namijenjene motrenju razine i kakvoće podzemnih voda. Prva bušotina (B-1, 300 m dubine) locirana je na području Dugopolja. Dvije opažačko-piezometarske bušotine, Gizdavac (B-3; 350 m dubine) i Konjsko (B-2; 300 m), locirane su duž pravca gdje je ustanovljena najbrža podzemna vodna veza prema izvorima Jadra i Žrnovnice. To je ujedno i područje koncentriranja svih doprinosa iz zapadnih i sjeverozapadnih dijelova sliva. Četvrta istražno opažačka bušotina locirana je na Biskom polju (B-4; 300 m dubine) na križanju dvije rasjedne zone zbog mogućega praćenja utjecaja sliva rijeke Cetine. Do danas su izbušene tri bušotine, u Dugopolju, Gizdavcu i Biskom polju, a dvije su opremljene za kontinuirano motrenje razine i kakvoće podzemne vode (Dugopolje, Gizdavac).

U okviru vrlo opsežnih i složenih hidrogeoloških istraživanja prvi put su potvrđeni i uspostavljeni odnosi područja napajanja izvora Jadra duž zapadne granice sliva gdje se zonalna razvodnica premješta zapadnije i južnije u odnosu na izvore u slivu Krke (Jaruga i Torak). Međutim, slivne odredbe u području priobalnoga izvora Pantana nisu još u potpunosti određene što će vjerojatno biti predmet nekih drugih istraživanja.

Prvi put su egzaktno potvrđeni i ustanovljeni odnosi vezani za slivne odredbe gdje se utjecaj zajedničkoga sliva pod razmatranim hidrološkim prilikama sa slivom Jaruge pomiče prema istoku. Pojava povišene koncentracije sulfata u vodi izvora Jaruge i dokazana vezanost te pojave s naslagama gipsa i anhidrita više pretpostavlja širenje sliva Jaruge na područje Kninskoga polja.

Zapadna granica sliva zonalnoga je karaktera, a ustanovljena je na području Postinja gdje je dokazano da Jaruga i Jadro dijele isti dio sliva pod različitim hidrološkim uvjetima. Razdoblje hidrološki niskih voda usmjerilo je traser prema Morinjskom zaljevu (izvorište Ribnik) i prema Marini kod Trogira, a nakon obilnijih oborina traser se prelio prema Jadru. Tijekom ovoga razdoblja opažanja na priobalnom izvoru Pantan traser se nije pojavio niti u tragovima, što je otvorilo i pitanje granice sliva Pantana sa slivom Jadra kao još za sada nedovoljno istraženo.

Međutim, zato se ponovno otvaraju pitanja vezana za istočni dio sliva i funkcioniranje barijere Sinjskoga polja. Egzaktno je dokazana velika sličnost sadržaja kisikovih i vodikovih izotopa ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) s izvora Ruda i Grab s vodom Jadra i Žrnovnice. Rezultati upućuju na sličnu nadmorsku visinu pretežitoga napajanja što nedvosmisleno upućuje na prekogranični karakter sliva Jadra i Žrnovnice.

Priljevno područje izvora Jadra i Žrnovnice će na području Hrvatske biti prvi krški sliv praćen pomoću dubokih opažačkih bušotina što će omogućiti pravovremene informacije o količini i kakvoći podzemnih voda unutar sliva važnih za vodoopskrbu grada Splita i šire okolice.

U konačnici potrebno je spomenuti i važnost koju će podaci polučeni kroz višegodišnju Studiju upravljanja vodama sliva Jadra i Žrnovnice imati u zaštiti i korištenju podzemnih voda ovog velikog sliva.²³

23 Zahvaljujemo JVP Hrvatske vode, poglavito OVP-u Split na financijskoj i stručnoj potpori koja je omogućila vrlo zahtjevna istraživanja i pridonijela znanstvenim spoznajama prezentiranim u ovom radu.

Literatura

- O. Bonacci – M. Kerovec – T. Roje-Bonacci – N. Štambuk-Giljanović 1995 Ognjen Bonacci – Mladen Kerovec – Tanja Roje-Bonacci – Nives Štambuk-Giljanović, *Određivanje biološkog minimuma rijeke Jadrta, Studija III*, Split 1995 (Sveučilište u Splitu, Građevinski fakultet, Fond stručne dokumentacije).
- O. Bonacci – T. Roje-Bonacci 1996 Ognjen Bonacci – Tanja Roje-Bonacci, *Određivanje biološkog minimuma rijeke Jadrta, Studija IV*, Split 1996 (Sveučilište u Splitu, Građevinski fakultet, Fond stručne dokumentacije).
- V. Denić-Jukić – D. Jukić 2002 Vesna Denić-Jukić – Damir Jukić, *Kompozitne kernel funkcije i njihova primjena na izvor Jadrta*, Hrvatske vode 10, br. 39, Zagreb 2002, 107-126.
- F. Fritz 1979 Franjo Fritz, *Općina Split. Hidrogeološka studija*, Zagreb 1979 (Hrvatski geološki institut, Fond stručne dokumentacije, br. 191).
- F. Fritz 1990 Franjo Fritz, *Trasiranje provedeno za potrebe izrade Osnovne hidrogeološke karte Republike Hrvatske 1:100.000*, Zagreb 1990 (Hrvatski geološki institut, Fond stručne dokumentacije).
- F. Fritz – J. Kapelj 1998 Franjo Fritz – Janislav Kapelj, *Osnovna hidrogeološka karta Republike Hrvatske M 1:100.000. Listovi Split i Primošten*, Zagreb 1988 (Hrvatski geološki institut, Fond stručne dokumentacije).
- F. Fritz – A. Pavičić – A. Renić – J. Kapelj 1988 Franjo Fritz – Ante Pavičić – Ante Renić – Janislav Kapelj, *Izvori Jadrta i Źrnovnica. Dio hidrogeoloških istražnih radova potrebnih za prijedlog zona sanitarne zaštite*, Zagreb 1988 (Hrvatski geološki institut, Fond stručne dokumentacije, br. 140).
- J. Kapelj – S. Kapelj 2004 Janislav Kapelj – Sanja Kapelj, *Trasiranje toka podzemne vode iz Colića ponora u Dugopolju. Hidrogeološka studija dispozicije oborinskih voda*, Split 2004 (Akvaprojekt, Fond stručne dokumentacije).
- S. Kapelj – J. Kapelj – I. Hip – J. Loborec – D. Dogančić 2009 Sanja Kapelj – Janislav Kapelj – Ivan Hip – Jelena Loborec – Dragana Dogančić, *Studija upravljanja vodama sliva Jadrta i Źrnovnice. Treća faza studijsko-istraživačkih radova*, Varaždin 2009 (Geotehnički fakultet, Fond stručne dokumentacije, br. 680/02).
- S. Kapelj – J. Kapelj – D. Jukić – V. Denić-Jukić 2008 Sanja Kapelj – Janislav Kapelj – Damir Jukić – Vesna Denić-Jukić, *Studija upravljanja vodama sliva Jadrta i Źrnovnice. Druga faza studijsko-istraživačkih radova*, Varaždin 2008 (Geotehnički fakultet, Fond stručne dokumentacije, br. 538/02).
- S. Kapelj – J. Kapelj – E. Prelogović – T. Marjanac 2006 Sanja Kapelj – Janislav Kapelj – Eduard Prelogović – Tihomir Marjanac, *Studija upravljanja vodama sliva Jadrta i Źrnovnice. Prva faza studijsko-istraživačkih radova*, Varaždin 2006 (Geotehnički fakultet, Fond stručne dokumentacije, br. 637/02).
- S. Kapelj – T. Marković – J. Kapelj – J. Terzić 2002 Sanja Kapelj – Tamara Marković – Janislav Kapelj – Josip Terzić, *Primjena hidrogeokemije u istraživanju hidrogeoloških sustava*, Zbornik radova okruglog stola Urbana Hidrologija, Split 25. – 26. travnja 2002, 61-74.

- T. Korbar – L. Fuček – D. Palenik – D. Matičec – M. Kuhta – A. Stroj 2006 Tvrtko Korbar – Ladislav Fuček – Damir Palenik – Dubravko Matičec – Mladen Kuhta – Andrej Stroj, *Geološka i hidrogeološka istraživanja na području predložene lokacije Centra za gospodarenje otpadom Splitsko-dalmatinske županije kod Lećevica*, Zagreb 2006 (Hrvatski geološki institut, Fond stručne dokumentacije, br. 68).
- I. Krajcar Bronić – N. Horvatinčić – J. Barešić – B. Obelić – P. Vreča 2004 Ines Krajcar Bronić – Nada Horvatinčić – Jadranka Barešić – Bogomil Obelić – Polona Vreča, *Isotope composition of precipitation in Croatia, Comparison of continental and maritime stations*, Proceedings of the international workshop on the application of isotope techniques in hydrological and the environment studies, September 6-8, Paris 2004.
- E. Mazor 2004 Emanuel Mazor, *Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology*, New York – Basel 2004.
- M. Oluić – R. Vasiljević – S. Burela 2004 Marinko Oluić – Ratko Vasiljević – Sonja Burela, *Elaborat o kompleksnim istraživanjima lokacije Kladrjice – Lećevica, I, II*, Zagreb 2004.
- A. Renić 1992 Ante Renić, *Određivanje zona sanitarne zaštite crpilišta Studenci*, Zagreb 1992 (Hrvatski geološki institut, Fond stručne dokumentacije).
- N. Štambuk-Giljanović 2006 Nives Štambuk-Giljanović, *Vode Dalmacije*, Split 2006.

Summary

Sanja Kapelj – Janislav Kapelj – Mirjana Švonja

Hydrogeological Characteristic of the Jadro and Žrnovnica Catchment

Key words: karst, groundwater, monitoring, delineation of catchments, tracing tests, stable isotopes

A ground water resources management within the large karst catchment requires comprehensive and detailed characterization of whole hydrogeological system. In this article, a part of results obtained during the study period, between 2005 and 2009, is presented. One part of results applied to relevant geological, structural and hydrogeological criteria for determination of sites suitable for monitoring quantity and quality groundwater monitoring in the drainage area of the Jadro and Žrnovnica springs by the deep monitoring boreholes. The other results concerned application of the tracing test results oxygen and deuterium stable isotope distribution in the Jadro and Žrnovnica spring waters as well as spring waters of surrounding catchments of the Krka River and the Cetina River for delineation of their drainage areas. Obtained knowledge will be very useful for further protection and management of this valuable ground water resource.