

UTICAJ CIRKULACIJE PODZEMNIH VODA U KARSTU NA POJAVU BAKTERIOLOŠKOG ZAGAĐENJA

Ljiljana VASIĆ, Saša MILANOVIĆ, Branislav PETROVIĆ, Zoran STEVANOVIĆ
Centar za hidrogeologiju karsta, Departman za hidrogeologiju,
Rudarsko-Geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu,
Dušina 7, Beograd

REZIME

Karstna izdan je zbog svojih jedinstvenih hidrogeoloških karakteristika izuzetno osetljiva na kontaminaciju patogenima. U radu su predstavljeni rezultati istraživanja kontaminacije karstne izdani, posebno bakterijama fekalnog porekla, koje predstavljaju najčešći uzročnik neispravnosti karstnih nekaptiranih i kaptiranih voda, pre bilo kakvog tretmana vode. Pitanje koje se postavlja i generalno objašnjava kroz rad je u kojoj meri pojava bakteriološke neispravnosti voda karstnih vrela može zavisiti od brzine i načina cirkulacije voda kroz karstno podzemlje, dok se sa druge strane razmatra i uticaj bakteriološkog zagađenja na proces vodosnabdevanja i zahvatanja voda, kako tokom istraživanja, tako i kroz faze projektovanja vodozahvata, i kasnije u fazi same distribucije vode. Kontinuirano praćenje distribucije fekalnih bakterija i ostalih bakterioloških "zagađenja", kao i fizičko-hemijskih parametara, omogućilo je bolje razumevanje procesa kojima se reguliše transport patogena u karstnim podzemnim vodama i moguće mikrobiološke kontaminacije vode za piće iz karstnih vrela. Promene u bakteriološkom zagađenju su prikazane kroz analizu vrela jednog karstnog sistema sa dva tipa isticanja, dubokom sifonalnom cirkulacijom i gravitacionim, odnosno sub-gravitacionim tipom isticanja, kao što su primeri vrela Kavak i Krupac (kaptirani za vodosnabdevanje Pirota). Monitoring ovih vrela, iskazan kroz analizu bakterioloških nalaza, u sprezi sa fizičko-hemijskim karakteristikama u sezonskim intervalima, daje nam uvid u funkcionisanje karstne izdani i njene bolje ili lošije autopurifikacione osobine. Naime, vrelo Kavak je vrelo koje se odlikuje dubokom sifonalnom cirkulacijom i kod njega nije uočeno prisustvo koliformnih bakterija fekalnog porekla, što i opravdava činjenicu da podzemne vode, krećući se dugo kroz sistem pukotina i manjih kanala u

anaerobnim uslovima, ne predstavljaju odgovarajuću sredinu za razmnožavanje mikroorganizama. Za razliku od sifonalnog tipa cirkulacije vrelo Kavak, vrelo Krupac je gravitacionog tipa i kod njega se jasno uočavaju sezonske promene bakteriološkog zagađenja u vidu ukupnih koliformnih bakterija, kao i koliformnih bakterija fekalnog porekla, sa povećanim brojem periodu malovođa (leto i zima), što se povezuje sa intenzivnijim korišćenjem zemljišta u pogledu poljoprivrede i stočarstva.

Ključne reči: karst, mikrobiologija, gravitaciona cirkulacija, sifonalna cirkulacija, vodosnabdevanje

UVOD

Karstne izdanske vode, koje su osnovni vid vodosnabdevanja oko 25 % svetske populacije (Ford & Williams, 1989), su ujedno i najpodložnije zagađenju u poređenju sa ostalim geološkim formacijama. Kvalitet karstnih voda se generalno odlikuje dobrim hemijskim, ali često nestabilnim bakteriološkim karakteristikama. Opšte je poznato da voda zahvaćena za potrebe vodosnabdevanja, prema „Pravilniku o higijenskoj ispravnosti voda“, mora biti bakteriološki potpuno ispravna, te pored mezofilnih bakterija u koncentraciji od 100bakterija/1 ml vode, ne sme sadržati koloidne bakterije, naročito one fekalnog porekla. Bakterije u karstne podzemne vode dospevaju na više načina i uglavnom kao posledica klimatskih uticaja, odnosno padavina i infiltracije vode u podzemlje. Stoga se često pojave bakteriološke neispravnosti voda mogu analizirati sezonski. Neispravnost može nastati kao produkt raspadanja i truljenja suspendovanog nanosa, dok fekalne i patogene bakterije u podzemlje mogu dospeti infiltracijom padavina ili površinskih tokova, koji spiraju sa površine deo zagađenja nastao poljoprivrednom ili stočarskom aktivnošću.

Poljoprivreda ima značajan uticaj na zagađenje vode putem rasturanja mineralnih i stajskih đubriva, kao i upotrebom različitih sredstava agrotehničke zaštite, koji filtracijom dospevaju u podzemne vode (Milanović et al., 2012).

U najvećem broju slučajeva, bakteriološka ispravnost, odnosno neispravnost voda na karstnim izvorima, vezuje se za režim isticanja, samim tim i povećanje mutnoće, koja se javlja u periodu velikih voda i često koristi kao indikator zagađenosti (Pronk et al., 2007). Naravno, pojava zamućenja ne mora uvek da inicira i pojavu bakteriološke neispravnosti vode, što je i slučaj kod vrela Kavak i Krupac, kaptiranih za potrebe vodosnabdevanja grada Pirot. Takođe, na izvorima gde se vode koje isteknu iz podzemlja zadržavaju u vidu manjih akumulacija ili zabarenja, posebno se otvara mogućnost razvoja bakterija zbog njihovog izlaganja svetlosti i povišenoj temperaturi. Uzorkovanje iz ovakvih izvorskih jezera i manjih akumulacija na izvorišnim zonama, često može dati pogrešnu sliku o bakteriološkoj neispravnosti i predstavlja bitan element u proučavanju pojave bakteriološkog zagađenja karstnih izdanskih voda.

Pored mutnoće, i praćenje pojedinih hemijskih elemenata može da ukaže na bakteriološko zagađenje. Na primer, prisustvo amonijaka u vodi je posledica prisustva organskih supstanci u fazi raspadanja i najčešće je znak fekalnog zagađenja vode, kao i kontakta sa otpadnim vodama. Organske supstance su, kao i amonijak, posledica mikrobiološkog raspadanja biljnih i životinjskih mikroorganizama ili metaboličkih aktivnosti uopšte, koje mogu dovesti do pojave nitrata, čijim povećanim unosom u organizam može doći do određenih zdravstvenih problema. Utrošak KMnO_4 ukazuje na povišen sadžaj organske materije u vodi, samim tim i potencijalno zagađenje.

Aerobne mezofilne bakterije se razvijaju u temperaturnom rasponu od 20-45 °C (mezofilno), uz prisustvo kiseonika (aerobno) i ne predstavljaju opasnost po čoveka, ukoliko se nalaze u dozvoljenim količinama u podzemnih vodama, odnosno 100 bakterija/1 ml. Međutim, dugotrajno korišćenje voda sa sadržajem ovih bakterija, može izazvati crevne poremećaje, ali i smanjenje imunološkog stanja organizma. Stoga je dezinfekcija ovakvih voda neophodna.

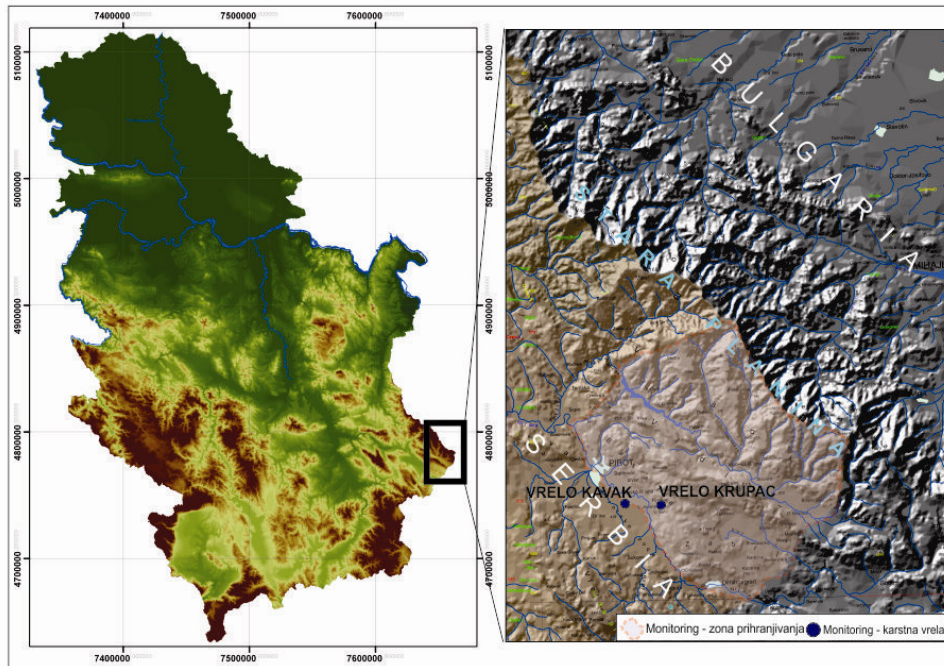
Koliformne bakterije se prirodno nalaze u intestinalnom traktu ljudi i životinja, tako da njihov nalaz u izvorskoj

vodi ukazuje na fekalno zagađenje. U bakterije fekalnog porekla spadaju: *Escherichiacoli*, *Enterococcus* i *Proteus*. U vodama, bez obzira da li su površinske ili podzemne vode, istražuju se bacili koliformne grupe, a u površinskim vodama, kao i u onim zahvaćenim na bunarima, se pored ovih često ispituju i *Clostridium perfringens* i bakteriofagi. *E. coli* spada u veoma „uporne“ bakterije, koje najčešće izazivaju urinarne infekcije, stoga nikako ne sme da se nalazi u vodi za piće. *Proteus* vrste su široko rasprostranjene u prirodi, a u vodama ukazuju na pojavu, kako zagađenja fekalnog porekla, tako i na zagađenost nastalu raspadanjem organske materije. Voda zatvorenih izvorišta može sadržati do 10 koliformnih bakterija na 100 ml, dok prirodna voda otvorenih izvorišta može da sadrži do 100 ovih bakterija, a koliformne bakterije fekalnog porekla, kao što je i navedeno, ne smeju biti zastupljene u vodi za piće. Naravno, nakon procesa dezinfekcije i prečišćavanja, vode zahvaćene bilo na otvorenim zonama isticanja ili zatvorenim izvorištima, moraju biti bakteriološki besprekorno čiste, te broj koliformnih bakterija u vodi za piće nije dozvoljen. Takođe, jedna od problematičnih bakterija koja se često javlja u karstnim vrelima je i *Pseudomonas aeruginosa*. *Pseudomonas aeruginosa* je veoma otporna bakterija, koja izaziva veliki broj infekcija, a naročito je sklona da napada organizam osoba kod kojih je imuni sistem oslabio. Razvija se u aerobnim uslovima, te se u slučaju karstnih izdanskih voda javlja tamo gde je izraženo zajezeravanje u zoni isticanja, naročito u periodu malovođa. Pojave zagađenja ove vrste u vodi nisu dozvoljene i neophodno je vršiti stalnu kontrolu sirove i prerađene vode.

OPŠTE KARAKTERISTIKE TERENA

Masiv Stare Planine se nalazi na jugoistoku Srbije (Slika 1), a teritorijalno pripada opštini Knjaževac na severu, opštini Pirot na jugoistoku, dok sam južni obod pripada opštini Dimitrovgrad. Opština Pirot je tradicionalno poljoprivredni kraj sa dominirajućom stočarskom i šumskom proizvodnjom. U pogledu geomorfoloških karakteristika jasno se izdvajaju dve morfološke celine: ravničarska oblast i brdsko-planinska.

Ravničarska oblast je predstavljena blago ustalasanim reljefom Pirotске kotline i predisponiran je rasednim strukturama, nalazi se na prosečnoj nadmorskoj visini od 400 m. Najvećim delom istražno područje je planinskog karaktera. Severoistočno od Pirota, duž granice prema Bugarskoj, pruža se veliki planinski



Slika 1. Geografski položaj istražnog terena sa vrelima Krupac i Kavak

venac Stare planine. Najviši vrh je Midžor sa 2170 m.n.v., izgrađen od crvenih permjskih pešćara. U geološkom sastavu Stare planine preovlađuju magmatiti i metamofiti prekambrijuma i paleozoika. Najznačajniji deo karbonatnih naslaga sačinjava planinu Vidlič, koja je ujedno i glavna zona prihranjivanja Pirotskih vrela.

Karbonatni mezozojski kompleks stena, intenzivno karstifikovan i prema morfološkim karakteristikama odgovara karakterističnim karstnim terenima, ima najveće rasprostranjenje na istražnom prostoru.

Karstni tip izdani izdvojen je u okviru karbonatnog mezozojskog kompleksa stena i to:

- srednetrijaskih krečnjaka i dolomita,
- klastita i karbonata dogera,
- krečnjaka sa rožnacima i dolomitima oksford-kimeridža,
- masivnih i bankovitih sprudnih krečnjaka titona,
- bankovitih, peskovitih i laporovitih krečnjaka valend-otriva,
- masivnih i bankovitih sprudnih krečnjaka barem-apt, tipične urgonske facije.

Stepen vodopropusnosti u okviru ovako definisanog vertikalnog profila nije jednak u svim delovima karbonatnog kompleksa stena, posebno u najnižim

delovima, u trijaskim i dogerskim sedimentima. Debljina karbonatnog kompleksa stena kreće se od nekoliko desetina metara, u zonama trijaskih i dogerskih naslaga, do preko 1000 m u obodnim delovima nekih planinskih masiva. Posebno pitanje se odnosi na rasprostranjenje karstifikovanog dela krečnjačke stenske mase, položaja baze karstifikacije u vertikalnom profilu. Ovo je veoma značajno, budući da su u okviru dubljih delova karstne izdani akumulirane znatne "statičke" rezerve izdanskih voda. Registrovani su intervali sa karstifikovanim krečnjacima u bušotini kod Krupca (okolina Pirota) u više intervala, na dubinama 129 - 355 m.

Za potrebe definisanja kvalitativnih i kvantitativnih karakteristika karstnih izdanskih voda koje su kaptirane za vodosnabdevanja Pirota uspostavljeno je režimsko osmatranje i to na 4 osmatračka punkta. Osmatrana su vrela: vrelo Krupac I, vrelo Krupac II, vrela Kavak i vrelo Gradište. Od prikupljenih podataka prikazani su kao najreprezentativniji rezultati, u pogledu uticaja bakteriološkog zagađenja, vrelo Krupac i vrelo Kavak, koji imaju različite tipove karstne cirkulacije. Analizirani podaci odnose se na dva ciklusa uzorkovanja i to: tokom 2005 godine i u periodu od januara 2008. godine do juna 2010. godine, od strane Zavoda za zaštitu zdravlja u Pirotu (ZZZZ, Piroto).

Vrelo Krupac je kaptirano za vodosnabdevanje i generalno spada u grupu gravitacionih, odnosno sub-gravitacionih karstnih vrela po svom tipu isticanja (slika 2). Tokom istraživanja 1986. godine, Krupac I je imao minimalnu izdašnost 220 l/s. Takođe je i zabeleženo da je tokom dugog recesionog perioda 1991. godine izdašnost iznosila samo 140 l/s. Slivna površina vrela Krupac I je oko 85 km². Sa ovog izvorišta, koje je udaljeno oko 10 km od Pirota, voda se gravitaciono dovodi kroz cevi 600 mm (kapacitet oko 300 l/s), do filterskog postrojenja Berilovac (kapaciteta oko 200 l/s), a preostala količina vode se bez tretmana cevovodom 400 mm (kapaciteta 100 l/s), odvodi u industrijsku zonu za potrebe fabrike Tigar, kao tehnička voda (Milanović et al., 2012).

Drugo vrelo, koje je analizirano za potrebe vodovoda, je vrelo Kavak (slika 3). Vrelo se nalazi usred Pirotskog polja, u lokalnosti Rogoz, istočno od grada na koti 370.5 m.n.m. Vrelo predstavlja tipično uzlazno izvorište – izdansko oko, sa Q_{min} od oko 85 l/s, dok maksimalna izdašnost ne prelazi Q_{max} više od 120 l/s. Najbliži otkriveni krečnjački izdanak udaljen je preko 2 km. Izdanske vode su genetski vezane za masiv Vidliča (istočni obod polja), kreću se ispod pliokvartarnih naslaga, a u zoni „podzemne barijere“ od aptskih peščara (koji najverovatnije izgrađuju podinu centralnog dela kotline u vidu pojasa SZ-JI), duž rasedne strukture cirkulišu naviše sve do zone isticanja (Milanović et al., 2012).



Slika 2. Uzorkovanje i monitoring podzemnih voda na vrelu Krupac



Slika 3. Uzorkovanje i monitoring podzemnih voda vrela Kavak

Na izvorištu Kavak izgrađena je kaptaža iz koje se voda upumpava u vodovodni sistem. Tokom sezonskih špiceva ukupna potrošnja vode sa vrela se koristi za vodosnabdevanje. Voda se bez ikakvog tretmana, osim preventivnog hlorisanja, preko crpne stanice Kavak uvodi u vodovodni sistem grada Pirot. Sa ovog izvorišta se vrši i vodosnabdevanje sela Donja Držina.

REZULTATI ISTRAŽIVANJA I ANALIZA

Vode vrela Krupac i Kavak su malomineralizovane, ukupne mineralizacije od 230 do 410 mg/l, hidrokarbonatno - kalcijumskog tipa. Voda je bez boje, mirisa i ukusa, a temperatura vode varira od minimalno zabeleženih 6.1°C do maksimalnih 18.9°C (tabele 1 i 2).

Vrelo Krupac predstavlja klasičan primer gravitacionog karstnog vrela, sa velikim godišnjim oscilacijama izdašnosti, dok se vrelo Kavak odlikuje stabilnim režimom isticanja. Stoga, hidrogeološki uslovi imaju veliki uticaj i na hemijski sastav podzemnih voda, ali i na mikrobiološki aspekt, odnosno njenu higijensku ispravnost. Usled postojanja direktne hidrauličke veze

između površinskih i podzemnih voda, zagađenja sa površine terena lako dospevaju u podzemne vode kroz proces spiranja i infiltracije (Stevanović et al., 2000).

Treba istaći da u odnosu na vrelo Krupac, koje pokazuje velike varijacije u količini istekle vode tokom godine, od letnjih minimuma do prolećnih maksimuma, bakterije koje ukazuju na antropogeno zagađenje na vrelu Kavak nisu uočene. Ovakav kvalitet podzemne vode na vrelu Kavak je posledica dublje sifonalne cirkulacije vode, koja osim na stabilnost režima isticanja utiče i na duži kontakt sredine sa vodom, uvećava mogućnosti samoprečišćavanja vode i samim tim održava stabilnim hemijski i mikrobiološki sastav (Milanović & Vasić, 2011). Dužina karstnih kanala i vreme koje podzemna voda koja ističe na vrelu Krupac provede u podzemlju, nije dovoljna da se obavi prirodno prečišćavanje infiltrirane vode, samim tim sve „nečistoće“ dospevaju do vrela i potencijalnih korisnika. Ovaj zaključak možemo dodatno dopuniti konstatacijom da je u svim uzorcima sa vrela Krupac dokazano prisustvo ukupnih koliformnih bakterija, što je posledica brze vodozamene u ovoj karstnoj izdani (slika 4).

Tabela 1. Fizičko-hemijske i bakteriološke karakteristike voda vrela Krupac (ZZZZ, Pirot)

datum	2005				2008				2009				2010				
	17.01	05.05	15.08	31.10	14.01	14.04	04.08	27.10	08.01	13.07	10.08	14.09	15.10	17.02	11.03	12.04	10.05
T	10.2	12.1	13.2	12.3	9.4	10.9	18.9	13.9	6.1		15.1	14.1	12.1	9.1	13.4	10	15.3
NTU	0.19	0.15	0.03	0.04	0.08	0.04	0.02	0.03	0.04		0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.09
pH	7	7	7	7	7	7	7.1	7.1	7		7.1	7	7.1	7	7	7.1	7
KMnO ₄	3.12	3.79	4.4	4.42	3.5	4.1	3.7	3.2	7		4.4	3.1	3.2	4.1	3.4	3.1	4.7
NH ₄ ⁺	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
NO ₂ ⁻	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
NO ₃ ⁻	4.76	3.84	6.3	6.42	4.3	3.24	7.46	6.94	5.48		7.93	8.45	8.98	4.78	4.28	5.29	4.6
EC	528	582	507	493	547	585	572	564	602		573	548	547	540	531	525	561
I*	20	16	13	18	16	2	9	12	16	14	3	2	3	6	0	3	3
II	1	2	10	5	8	5	1	10	10	9	4	2	5	2	6	2	2
III	0	0	0	0	5	4	0	0	7	0	3	0	0	5	6	1	1
IV	0	9	6	17	2	2	6	13	0	13	3	0	0	1	0	8	3
V	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1
VI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VII	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

* I Koliformne bakterije; II Aerobne mezofilne; III Sulfitoredukujuće Sporogene; IV Koliformne bakterije fekalnog porekla; V Fekalne streptokoke; VI Proteus vrste; VII Pseudomonas aeruginosa.

Tabela 2. Fizičko-hemijske i bakteriološke karakteristike voda vrela Kavak (ZZZZ, Pirot)

datum	2005				2008				2009					2010			
	24.01	05.05	01.08	31.10	14.01	14.04	04.08	27.10	08.01	13.07	10.08	14.09	15.10	04.02	11.03	12.04	10.05
T	12.3	12.3	14.5	12.5	14.3	14.4	14.5	14.4	14.3	14.6	15.1	14.5	13.5	13.8	12.1	14.8	14.5
NTU	0.05	0.05	0.1	0.03	0.02	0.04	0.02	0.02	0.04	0.05	0.05	0.03	0.03	0.05	0.03	0.04	0.02
pH	7.1	7.1	7.2	7	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7	7.1	7.1	7.1	7.1	7
KMnO ₄	3.77	3.16	3.79	3.48	3.5	4.1	3.4	3.8	6.6	3.4	4.7	4.1	4.1	3.4	4.1	2.8	3.4
NH ₄ ⁺	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NO ₂ ⁻	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NO ₃ ⁻	8.58	8.32	9.08	8.83	8.77	8.05	7.64	8.62	7.48	9.02	9.09	9.01	8.76	8.63	8.2	8.84	8.32
EC	545	576	499	582	579	585	588	579	577	573	576	572	571	570	571	571	574
I*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
II	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	1	0
III	0	0	0	0	40	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0
IV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
VI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VII	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

* I Koliformne bakterije; II Aerobne mezofilne; III Sulfitoredukujuće Sporogene; IV Koliformne bakterije fekalnog porekla; V Fekalne streptokoke; VI Proteus vrste; VII Pseudomonas aeruginosa.

Koncentracija nitrata u uzorcima vode sa oba vrela je u dozvoljenim granicama, ali su na vrelu Kavak uočene koncentracije nešto veće nego na vrelu Krupac, što ukazuje na duži boravak vode u podzemlju i stvaranje uslova za povećanje koncentracije nitrata usled metaboličkih procesa mikroorganizama ili njihovog raspadanja.

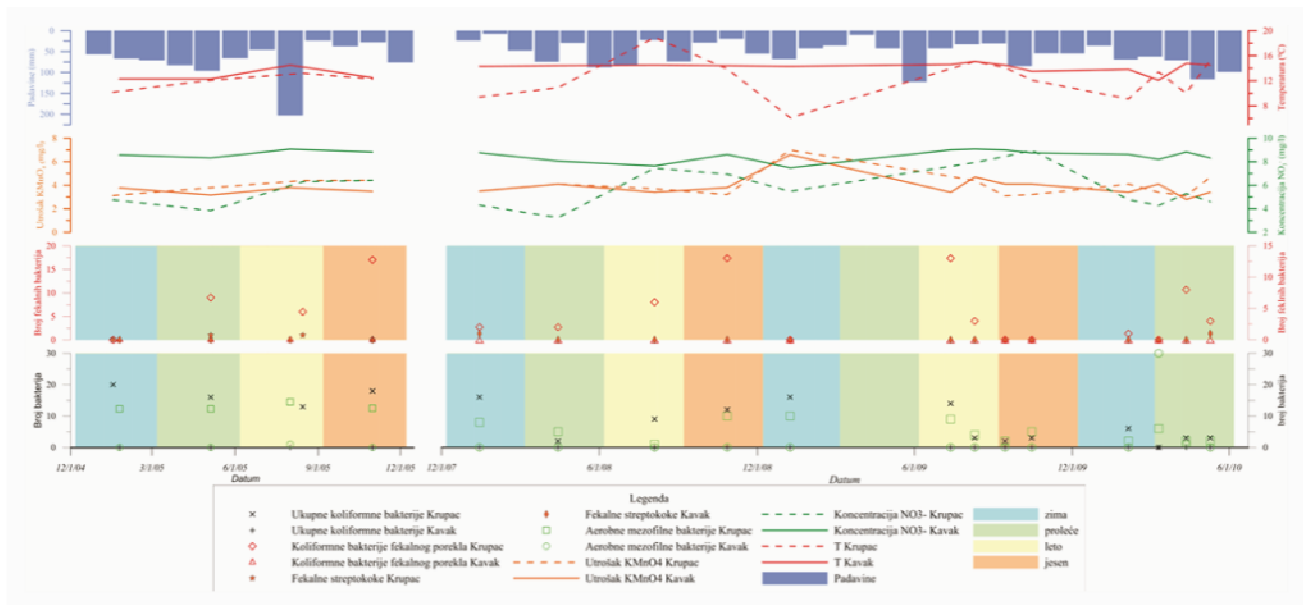
Vrednosti utroška KMnO₄ su znatno niže od dozvoljene granice od 8 mg/l, što govori da na vrelima Krupac i Kavak nema zagađenja u pogledu povišenog sadržaja organske materije u vodi.

Ni u jednom uzorku vode sa vrela Kavak nisu pronađene fekalne streptokoke, niti koliformne bakterije (ni ukupne, ni fekalnog porekla), što ukazuje na visok nivo prirodne zaštite podzemnih voda od antropogenog uticaja (tabela 2). Sa druge strane, vrelo Krupac pokazuje sve znake postojanja antropogenog zagađenja. U svim uzorcima vode koji su podvrgnuti analizi, utvrđeno je prisustvo bakterija fekalnog porekla u znatnom broju (maksimalno 17 bakterija/l ml u oktobru 2010. godine). Broj utvrđenih bakterija je veći u periodu letnjih i zimskih minimuma, nego u vreme proleća i jeseni (tabela 2). Manji broj bakterija u prolećnim i jesenjim uzorcima su posledica količine vode u karstnoj izdani, samim tim prirodno prečišćavanje, iako manje

nego kod izdanskih voda vrela Kavak, je u stanju da donekle umanju broj bakterija koje su dospеле u izdan spiranjem sa površine (slika 4).

Što se tiče aerobnih mezofila, prisutni su u vodi koja ističe iz vrela Krupac u svim uzorcima, kao posledica brze vodozamene (maksimalno 10 bakterija/ml uzorka vode). U vodi vrela Kavak, aerobne mezofilne bakterije su utvrđene u većem broju samo u jednom uzorku (30 bakterija/l ml) iz marta 2010. godine (tabela 1). Visok broj bakterija može biti posledica niskog nivoa podzemnih voda i infiltriranja vode potekle od topljenja snega, udružene sa infiltriranim padavinama.

Fekalne streptokoke su zabeležene u većini uzoraka iz vrela Krupac, dok su u vodi vrela Kavak zabeležene u dva navrata. U oba slučaja je bila zastupljena samo jedna bakterija u uzorku vode. Prisustvo streptokoka u vodi vrela Krupac je verovatno uzrokovano istim razlozima, kao i prisustvo koliformnih bakterija. S druge strane, pojavljivanje ovih bakterija u maju 2010. godine na vrelu Kavak, posledica je intenzivne infiltracije padavina, koje su izvršile spiranje površinskih delova tla i odnošenje sveprisutnih bakterija do izdanskih voda i kasnije do vrela. Bakterija *Pseudomonas aeruginosa* je nađena na oba vrela,



Slika 4. Uporedni dijagram sezonskih promena određenih kvalitativnih i kvantitativnih karakteristika karstnih vrela Krupac i Kavak (na osnovu analiza ZZZZ Pirot)

ali samo po jedna bakterija u uzorku (na Kavaku u martu 2010. godine, a na Krupcu u avgustu 2009. godine), što bi konkretno na Kavaku moglo da ukaže na sporiju vodozamenu u kaptaži u prolećnom periodu, obzirom da Kavak radi sa manjim kapacitetom, jer Krupac I i II, zajedno sa Gradištem, daju dovoljne količine voda za vodosnabdevanje. Samim tim, voda iz Kavaka se duže zadržava u kaptaži, prilikom čega biva izložena aerobnim uslovima i stvara sredinu pogodnu za razmnožavanje bakterije. Proteus vrste nisu registrovane ni u jednom uzorku na oba vrela.

KONCEPTUALNI MODEL

Konceptualizacija problema cirkulacije podzemnih voda u karstu i njihov uticaj na pojavljivanje bakteriološkog zagađenja je izvedena kroz analizu podataka sa vrela Kavak i Krupac. Osnovne pretpostavke, koje su uzimane u obzir za generalno definisanje problema, moraju se posmatrati kroz tri odvojena segmenta: formiranje zagađenog tela, njegov transport i način pojavljivanja. Da bi se mogao uopšte formirati model „ulaz – izlaz“, za ovakvu problematiku neophodno je oformiti i definisati sledeće podloge:

- hidrogeološke podloge – definisanje tipa cirkulacije kod određenih vrela, odnosno brzinu podzemnog toka, vreme zadržavanja u podzemlju, kao i promene fizičko-hemijskih parametara tokom vremena.

Takođe, parametri koji ulaze u ovu grupu su i prihranjivanje i isticanje, odnosno ponašanje izdani u različitim sezonama;

- podloge poljoprivrednih i stočarskih aktivnosti u različitim sezonama i njihov prikaz kroz CORIN karte, odnosno karte Land Use;
- podloge topografije i morfologije terena, koje direktno utiču na brzinu infiltracije i oticanje;
- geološke podloge – koje kroz rupturni sklop i litološke karakteristike, takođe daju određen niz podataka za potrebe formiranja ovakvog modela.

Radi što boljeg razumevanja specifičnosti cirkulacije bakteriološkog zagađenja, definisana su osnovna konceptualna načela kod vrela Kavak i Krupac:

- zajednička je zona prihranjivanja izdani koja se drenira kroz ova dva vrela, što znači da su ulazni parametri za oba posmatrana vrela isti;
- radi se o velikim karstnim vrelima, sa pretpostavkom da su kanali kojima se drenira vrelo Krupac, znatno razvijeniji od kanala vrela Kavak;
- brzina podzemnog tečenja kod vrela Krupac je velika, često i preko 1 cm/s, što znači da je vreme zadržavanja u podzemlju vrlo kratko, kao i vreme koje bakterije provode u podzemlju (u poređenju sa nekim

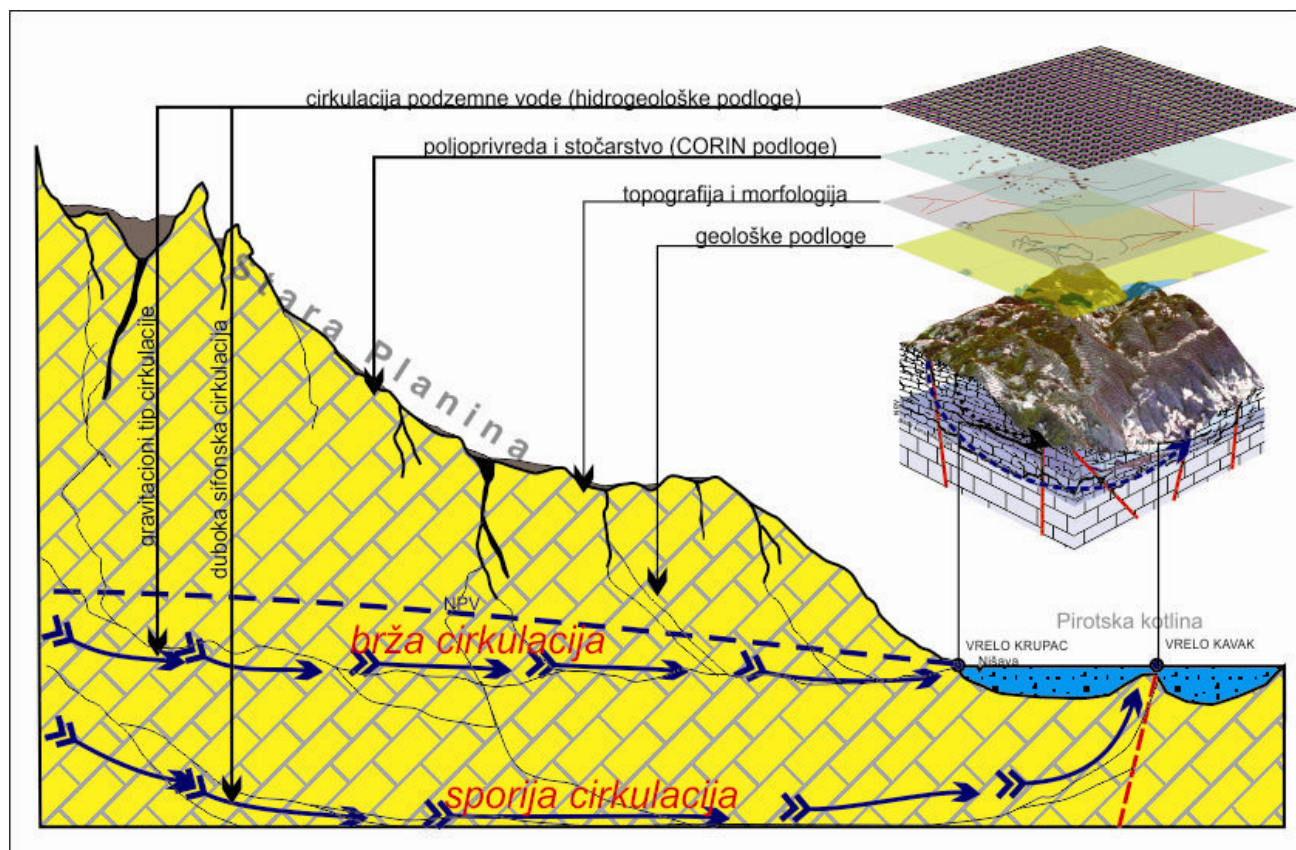
- nekarstnim izdanima, gde je brzina podzemne vode od 10 do 100 m godišnje);
- brzina cirkulacije podzemnih voda u kanalima i pukotinama koje zaležu mnogo dublje > 100 m od kote isticanja je veoma usporena, kao što je to i slučaj kod vrela Kavak. Usled takve cirkulacije, vreme koje bakterije provode u podzemlju je 8 do 10 puta duže nego u slučaju vrela Krupca.
 - zbog same morfologije kanala, može se reći da u slučaju vrela Krupac, odnosno kanala kojima cirkuliše voda do zone isticanja, vladaju uglavnom aerobni uslovi (pogotovo u zoni oscilacije nivoa podzemnih voda), dok u slučaju vrela Kavak se radi o anaerobnim uslovima.

Ovakav konceptualni model je zasnovan na dva osnovna principa: vremenu koje voda provede u

podzemlju i rastojanju koje podzemna voda prelazi od mesta infiltracije do vodozahvatnog objekta ili tačke isticanja (Milanović, 2012).

Karstni sistemi generalno imaju dve jasno izražene tačke uticaja zagađenja, bez mogućnosti prečišćavanja: prva – zona infiltracije kroz ponore, ponorske zone ili pukotinske sisteme do zone potpune saturacije, odnosno zone nivoa podzemnih voda; druga – zona dreniranja, odnosno prostor gde na veoma malom rastojanju dolazi do mešanja podzemnih i površinskih voda neposredno pre isticanja (Milanović, 2012).

Na slici 5 su shematski prikazane zone uticaja površinskih agenasa na podzemne vode, i to za slučaj gravitacione i sifonske cirkulacije.



Slika 5. Konceptualni model cirkulacije i dreniranja za karstna vrela Krupac i Kavak

Ova istaživanja su podstaknuta činjenicom da je stanje u oblasti vodosnabdevanja u Srbiji i okruženju sve teže, jer se izvorišta podzemnih i površinskih voda najvišeg kvaliteta ubrzano iscrpljuju, na šta ukazuje i Prostorni plan Srbije (Đorđević, 2008). Zbog neadekvatne zaštite izvorišta od raznih uticaja antropogenog porekla i pored napora da se ostvari održivo upravljanje podzemnim vodama (Polomčić, 2012), moraju se koristiti i izvorišta čiji je kvalitet narušen određenim nepovoljnim uticajima u Srbiji, kao i u okruženju (Buslagić, 2009), (Toholj, 2012), (Polomčić, 2010). Imajući u vidu tu činjenicu, autori su i usmerili ova istraživanja, obzirom da je udeo karstnih voda u vodosnabdevanju Srbije vrlo značajan, pa se moraju razmatrati svi vidovi modeliranja i zaštite takvih izvorišta (Milanović, 2012b).

DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

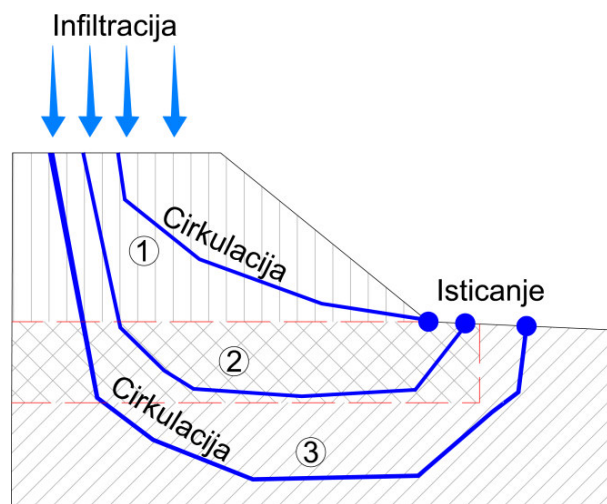
Na osnovu svega dobijenog iz istraživanja vrela Kavak i Krupac, kao i na osnovu istraživanja sprovedenih na drugim karstnim vrelima, pretežno Kučajsko-Beljaničkog masiva, generalno se može zaključiti da cirkulacija podzemne vode u karstu i uticaj na bakteriološko zagađenje zavisi od nekoliko faktora.

Na osnovu ranije objašnjenih faktora u tekstu ovog rada, mogu se rasčlaniti tri vida kretanja voda kroz karstnu izdan (slika 6), sa direktnim uticajem na bakterije koje dospevaju sa infiltriranim vodom:

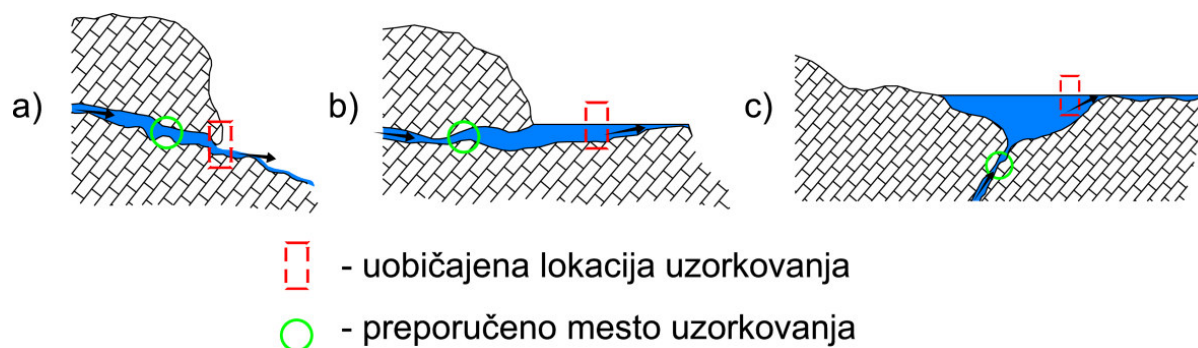
1. gravitaciona cirkulacija podzemne vode usled postojanja velikih kanala, koja se odlikuje brзом vodozamenom, kratkim zadržavanjem vode u podzemlju i sa odlikama aerobnih uslova, kao u uslovima vrela Krupac (i npr. Malo i Veliko vrelo na Beljanici, vrelo Crnice, vrelo Grze, vrelo Crnog Timoka itd.);
2. sifonalna cirkulacija podzemne vode u uslovima postojanja velikih kanala metarskih dimenzija (prečnik), koji se takođe odlikuju velikim brzinama i brзом vodozamenom i često aerobnim uslovima u jednom delu svog podzemnog toka, kao što je npr. Krupajsko vrelo, vrelo Mlave itd.;
3. sifonalna cirkulacija podzemne vode u uslovima pukotinske poroznosti, gde se voda kreće kroz kanale i pukotine milimetarskih do santimetarskih dimenzija, pri čemu je cirkulacija veoma spora, odnosno vodozmena je usporena. U ovom slučaju se radi o potpuno anaerobnim uslovima, sa dugim zadržavanjem vode u podzemlju, kao što je primer

vrela Kavak (i npr. vrelo Banjica kod Milanovca, vrelo Vape itd.).

Takođe, jedan od bitnih elemenata u analiziranju pojave bakterioloških zagađenja na karstnim vrelima je i sama zona isticanja (slika 7), odnosno lokacija uzorkovanja voda. Zapravo, zanemarivanje lokacije samog uzorkovanja, često može dati pogrešnu sliku o bakteriološkoj ispravnosti voda nekog karstnog vrela. Tu se javlja osnovni problem, kako i gde uzorkovati vodu. Budući da često karstna vrela ističu u vidu zajezerenih depresija, gde je vodozmena znatno usporena, dolazi do uticaja lokalnog faktora koji „in-situ“ donosi zagađenje (bakteriološko), a da pri tome voda na određenoj dubini u karstnim kanalima, često ima mnogo manje ili uopšte nema registrovanih bakterija, kao na površini (dokazano kroz uzorkovanja na Krupajskom vrelu i vrelu Mlave, Milanović et al., 2012). Shodno navedenom, jedino voda koja se direktno uzorkuje iz karstnog kanala prikazuje tačne mikrobiološke karakteristike vode. Upravo zbog ovakvih problema, kod definisanja mikrobiološkog zagađenja karstnih izdanskih voda treba više pažnje pokloniti načinu monitoringa i uzorkovanja podzemnih voda iz karstnih vrela (gde za to postoje uslovi), što je shematski i prikazano za neke tipove isticanja.



Slika 6. Shematski prikaz mogućih tipova cirkulacije u karstu: 1) gravitaciona cirkulacija / brza vodozmena / kanali velikih dimenzija, 2) sifonalna cirkulacija / brza vodozmena / kanali velikih dimenzija, 3) sifonalna cirkulacija / usporena vodozmena / kanali malih dimenzija (pukotine, prsline).



Slika 7. Shematski prikaz tipova drenažnih zona i lokacija uzorkovanja: a) gravitaciono isticanje; b) zajezerena zona pri gravitacionom isticanju; c) zajezerena depresija pri sifonalnom isticanju

ZAHVALNICA

Za potrebe izrade ovog rada, korišćeni su podaci dobijeni učešćem na projektima Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja: Potencijal i podloge za održivo korišćenje podzemnih voda (OI-176022) i Ocena uticaja klimatskih promena na vodne resurse Srbije (TR-37005).

LITERATURA

- [1] Buslagić H., 2009: Konvencionalne metode prečišćavanja vode za piće, *Vodoprivreda*, N^o 237-239, s. 61-68, Beograd
- [2] Đorđević B., 2008: Realizacija razvoja vodoprivredne infrastrukture u skladu sa strategijom iz Prostornog plana Srbije, *Vodoprivreda*, N^o 234-236, s.215-226, Beograd
- [3] Ford D. C., Williams P., 2007: *Karst Hydrogeology and Geomorphology*, Monography, ISBN: 978-0-470-84996-5, p 576
- [4] Milanović S., Stevanović Z., Vasić Lj., Ristić-Vakanjac V., 2013: 3D modeling and monitoring of karst system as a base for its evaluation and utilization: a case study from eastern Serbia, *Environmental Earth Sciences*, doi: 10.1007/s12665-013-2591-9
- [5] Milanović S., 2012: Speleologija i speloronjenje u hidrogeologiji karsta, *Monografija, RGF*, Beograd, s: 314
- [6] Milanović S., Stevanović Z., Vasić Lj., Saljnikov E., Povrenović D., 2012: Land Use and Groundwater Quality in the Test Areas, *CCWaters – Climate Changes and Impacts on Water Supply*, Monography, Zoran Stevanović, Vesna Ristić-Vakanjac and Saša Milanović (eds), s: 259-286
- [7] Milanović S., Vasić Lj., Kličković M., 2012 b: Formiranje 3D modela karstnih kanala u zoni isticanja vrela kao podloga za zahvatanje podzemnih voda u karstu, *Vodoprivreda*, N^o 258-280, s. 169-174, Beograd
- [8] Milanović S., Vasić Lj., 2011: Hidrogeološka osnova zaštite podzemnih voda u karstu na primeru Beljanice, *Vodoprivreda*, N^o: 252-254, s: 165-173, Beograd
- [9] Milanović S., Stevanović Z., Vasić Lj., 2010: Monitoring podzemnih voda Beljaničkog masiva u funkciji formiranja modela karstnog sistema, *Vodoprivreda*, N^o: 246-248 s. 209-222, Beograd
- [10] Polomčić D., Stevanović Z., Bajić D., Hajdin B., Vakanjac-Ristić V., Dokmanović P., Milanović S., (2012): Vodosnabdevanje i održivo upravljanje podzemnim vodnim resursima Srbije, *Vodoprivreda*, N^o 258-280, s. 225-232, Beograd
- [11] Polomčić D., Stevanović Z., Milanović S., Sorajić S., Hajdin B., Kljajić Ž., (2010): Održivo korišćenje mađarsko-srpskih međugraničnih vodnih tela, *Vodoprivreda*, N^o 246-248, s.223-2236, Beograd
- [12] Pronk M., Goldscheider N., Zopfi J., 2007: Particle-size distribution as indicator for fecal bacteria contamination of drinking water from karst springs, *Environmental Science & Technology*, Vol. 41, No 24, pp: 8400-8405
- [13] Stevanović Z., Jemcov I., Dokmanović P., Nikolić J., 2000: An example of bacteriological contamination of a captured spring,

- Hydrogeological research of lithosphere in Serbia, Monography, Zoran Stevanović, Dušan Polomčić (eds), pp: 71-78
- [14] Stevanovic Z., Jemcov I., Vidovic M., 1996: Preventive protection of karst water resources in Serbia of particular importance for water supply, Intern. conf. "The impact of industry on groundwater resources", Cernobbio, pp: 507-514
- [15] Toholj N., Glavaš S., Jolović B., 2012: Pitka voda u sistemu vodosnabevanja stanovništva u Republici Srpskoj, Vodoprivreda, N^o 258-260, s. 241-246, Beograd
- [16] Zavod za zaštitu zdravlja Pirot, 2005-2010: Izveštaj o ispitivanju hemijske i mikrobiološke ispravnosti vode

MICROBIOLOGICAL POLLUTION AS THE FUNCTION OF KARST GROUNDWATER CIRCULATION

by

Ljiljana VASIĆ, Saša MILANOVIĆ, Branislav PETROVIĆ i Zoran STEVANOVIĆ
Center for Karst Hydrogeology, Department of Hydrogeology,
Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade,
Djusina 7, Belgrade

Summary

Karstic groundwater, because of its unique hydrological characteristics, is extremely sensitive to contamination with pathogens. In this paper results of contamination of karst aquifers are presented, especially from bacteria of faecal origin that usually cause of failure of non-tapped and tapped karst groundwater before any water treatment. The question and explanation is in which level the occurrence of bacterium in karst water can affect water supply and water abstraction, predominantly in the water intake object, and later, along the water distribution system. Continuous monitoring of faecal bacteria and other bacterial "contamination", as well as physical and chemical parameters, allowed a better understanding of the processes governing the transport of pathogens in karst groundwater and possible microbial contamination of drinking water from karst springs. On the other hand, it is also important how the type of underground karst water circulation can affect the transport of microbial contamination. Bacterial contamination changes are shown through the analysing of Kavak and Krupac springs case study (tapped for water supply of Pirot) the karst spring system with two types of discharge, deep

siphonal and gravity, or sub-gravity type of circulation. The proper monitoring of these karst springs is shown through the analysis of a sufficient number of bacteriological analysis and its correlation to physical and chemical characteristics in seasonal intervals, gives us an insight into the functioning of karst aquifer and a level of autopurification properties. The Kavak spring is deep siphonal circulation spring and the presence of coliform bacteria of faecal origin was not observed in it, which justifies the fact that ground water circulation through the long system of cracks and channels, in anaerobic conditions, do not present environment suitable for reproduction of microorganisms. Unlike the Kavak spring, the Krupac spring is typical gravitational spring, with clear seasonal changes of bacterial pollution, observed in the form of total coliform bacteria and coliform bacteria of faecal origin, that usually occurs in period of low water discharge (summer and winter), which is associated to intensive land use during previous seasons in terms of agriculture and grazing.

Key words: karst, microbiology, groundwater circulation, watersupply

Redigovano 29.10.2013.