

UTICAJ ZEMLJIŠTA I EPIKARSTA NA PROCES FORMIRANJA KVALITETA KARSTNIH PODZEMNIH VODA ISTOČNOG DELA SUVE PLANINE

Branislav PETROVIĆ¹, Živojin SMILJKOVIĆ², Veljko MARINOVIĆ¹

¹Rudarsko-geološki fakultet u Beogradu, Departman za hidrogeologiju, Centar za hidrogeologiju karsta

²Agencija za zaštitu životne sredine Republike Srbije

REZIME

Različite supstance, kako pravi tako i koloidni rastvori, migriraju i cirkulišu kroz zemljište, gde se dešavaju brojne hemijske reakcije. Kao rezultat ovog kretanja i biološke aktivnosti organizama, formiraju se slojevi sa specifičnim fizičko-hemijskim i biološkim svojstvima. Ovaj proces predstavlja prvi korak u promeni sastava površinske vode koja se infiltrira i postepeno prelazi u podzemne vode. Rastvaranje krečnjaka je već prilično intenzivno u površinskim zonama krečnjačka - epikarsta, o čemu svedoče podaci prikupljeni sa lokaliteta pećine Peč na Suvoj planini. Porast pH i specifične električne provodljivosti, uz povećanje koncentracija osnovnih jona: elemenata i mikroelemenata (pre svega iz zemljišta), ukazuje na značajne promene u sastavu infiltrirane vode na ulazu u karstni sistem. Kako voda nastavlja da se filtrira kroz krečnjačke stene na površini i karstifikovani krečnjak ispod, procesi rastvaranja krečnjaka i obogaćivanja podzemnih voda kalcijumom i magnezijumom, zajedno sa bikarbonatima, postaju dominantni. Dakle, podzemne vode koje izviru iz karstnih izvora u podnožju istočnih padina Suve planine imaju katjonski sastav u kome prvenstveno dominiraju kalcijum (>85% ekv) i magnezijum (~12% ekv), dok bikarbonati prelaze 95% ekv, a ostale makrokomponente (natrijum, kalijum, sulfati, hlorigeni) su prisutne u koncentracijama ispod 3% ekv.

Ključne reči: epikarst, zemljišni sloj, pećina Peč, kvalitet podzemne vode

Podaci o prihvatanju članka

Primljen: 2.11.2024.

Ispravljen: 11.11.2024.

Prihvaćen: 18.11.2024.

Kontakt: branislav.petrovic@rgf.bg.ac.rs

1. UVOD

Stanovništvo Srbije za vodosnabdevanje koristi oko 23 m³/s podzemne vode, a oko 18% podzemnih voda koje se koriste, potiče upravo iz karstnih izdani (Polomčić et al. 2011, 2021). Ukoliko uzmemo u obzir da karst može akumulirati značajne količine podzemnih voda odličnog kvaliteta, moramo zaključiti da karstne izdani u Srbiji, kao i u svetu, predstavljaju jedan od značajnih resursa pitke vode. Epikarst predstavlja zonu delimično izmenjene matične (karbonatne) stene koji je još uvek daleko od toga da postane zemljište, ali u kojem je vodopropusnost i difuzna cirkulacija vode u velikoj meri veća i ravnomernije raspoređena u prostoru (i horizontalno i vertikalno) u odnosu na ostatak karstifikovane stenske mase. U suštini epikarst predstavlja najviši deo stenske mase koji je izložen procesu karstifikacije (Petrović et al, 2022, Klimchouk, 2000). Za hidrogeološku funkciju ove pripovršinske zone veoma je važno postojanje kontrasta u vertikalnom profilu u pogledu efektivne poroznosti i propusnosti između zone epikarsta i ostatka karbonatne stenske mase. Takođe, u pogledu izmene kvaliteta vode i uticaja na količinu vode koja se filtrira ka karstnoj izdani (Petrović, 2020) epikarst može imati značajan uticaj. Ova izdan, formirana u epikarstu razlikuje se od lebdećih izdani koje su formirane u integranularnoj sredini po tome što se kvantitativne osobine lebdećih izdani formiranih u zbijenoj izdani ne razlikuju od osobina osnovne izdani, čak je i kvalitet vode skoro isti, dok izdan u epikarstu ima drugačije odlike od karstne izdani i u pogledu brzine i karaktera filtracije vode i u pogledu kvaliteta vode (Petrović, 2020).

Najznačajnije zaključke o procesu nastanka epikarsta u okviru karstnog sistema doneli su: Williams (1983); Gunn (1985); Ford & Williams (2007); Klimchouk (1995, 2004). Do određenih zaključaka o epikarstu kao

svojevrstnoj polupropusnoj membrani dolazi Bakalowicz (2005), dok „efekat klipa“ koji se uočava u izdani analiziraju Trček (2003) i Trček & Krothe (2004), a „pulsni pritisak“ Williams & Fowler (2002) i Kogovšek (2010). Stevanović (2015) prihvata da epikarst često postoji u gornjim delovima zone aeracije i da u njemu dolazi do akumuliranja određene količine podzemne vode i formiranje lebdeće izdani, ali sa druge strane smatra i da se mora uzeti u obzir da na izuzetno karstifikovanim terenima može doći do brzog dreniranja vode i da epikarst može izostati. Petrović (2020) ističe da epikarst u okviru karstnog izdanskog sistema može da utiče na poboljšanje kvaliteta i bolju raspodelu količina podzemnih voda koje ističu iz karstne izdani.

2. OPŠTE KARAKTERISTIKE ISTRAŽNOG PODRUČJA

Suva planina se nalazi oko 10 km jugoistočno od grada Niša (slika 1). U geološkom i geografskom smislu Suva planina pripada Karpato-balkanskom lancu planina, na granici sa Srpsko-makedonskom masom. Prostire se u vidu potkovicice (lučno) počev od sela Ljuberađa (Opština Babušnica) u dva smera: severnim krakom do Crvene Reke i severozapadnim krakom do Niške Banje. U pogledu visinskih zona kreće od 250 m.n.m. dok je najveća visina 1810 m.n.m. Planinski deo terena se karakteriše jako razuđenim reljefom sa velikim visinskim razlikama. Površinski karstni oblici prisutni su na skoro svim delovima istočne padine Suve planine, uprkos postojanju guste šumske (visoke i niske) vegetacije. Podzemni karstni oblici su na istočnim padinama Suve

planine prisutni, ali ne kao na severnim i zapadnim okomitim krečnjačkim liticama. Na užem prostoru istraživanja, mogu se izdvojiti sasmo jama Prosek i pećina Peč, u ataru sela Bežište (Petrović, 2020).

Na istražnom području zastupljena je umereno-kontinentalna klima sa karakterističnim dugim i hladnim zimama i relativno toplim letima. Deo područja na nadmorskim visinama iznad 800 m ima karakteristike planinske klime. U cilju analize pluviometrijskog režima i njegovog uticaja na režim podzemnih i površinskih voda istražnog područja korišćeni su raspoloživi podaci Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije (RHMZ) za period od 1991–2018. godine, za stanice Niš, Bela Palanka i Babušnica. Maksimalna srednja mesečna suma padavina u periodu 1991-2018. godine izlučuje se krajem proleća i početkom leta (maj–jun) (Tabela 1), a minimalne količine padavina zavise od meteorološke stanice (nadmorske visine), pa se u Babušnici najmanje padavina u vidu kiše izluči tokom februara i marta, a u Beloj Palanci i Nišu tokom avgusta i tokom perioda januar-februar. Srednje višegodišnje sume padavina za analizirani period 1991-2018. godina imaju vrednosti od 593,8 mm do 680,9 mm (Petrović, 2020).

Posmatrano u višegodišnjem periodu prosečne godišnje temperature su od +9,9°C do +13,8°C. Za celo područje se može izvesti zaključak da u toku jedne kalendarske godine temperatura vazduha ima stalni rast od najhladnijeg meseca januara, pa do najtoplijeg jula, a zatim opada do decembra.

Tabela 1. Srednje mesečne i srednja godišnja suma padavina (mm) za period 1991-2018. godine, za klimatološke stanice „Babušnica“-1, „Bela Palanka“-2 i „Niš“-3 (RHMZ, Beograd)

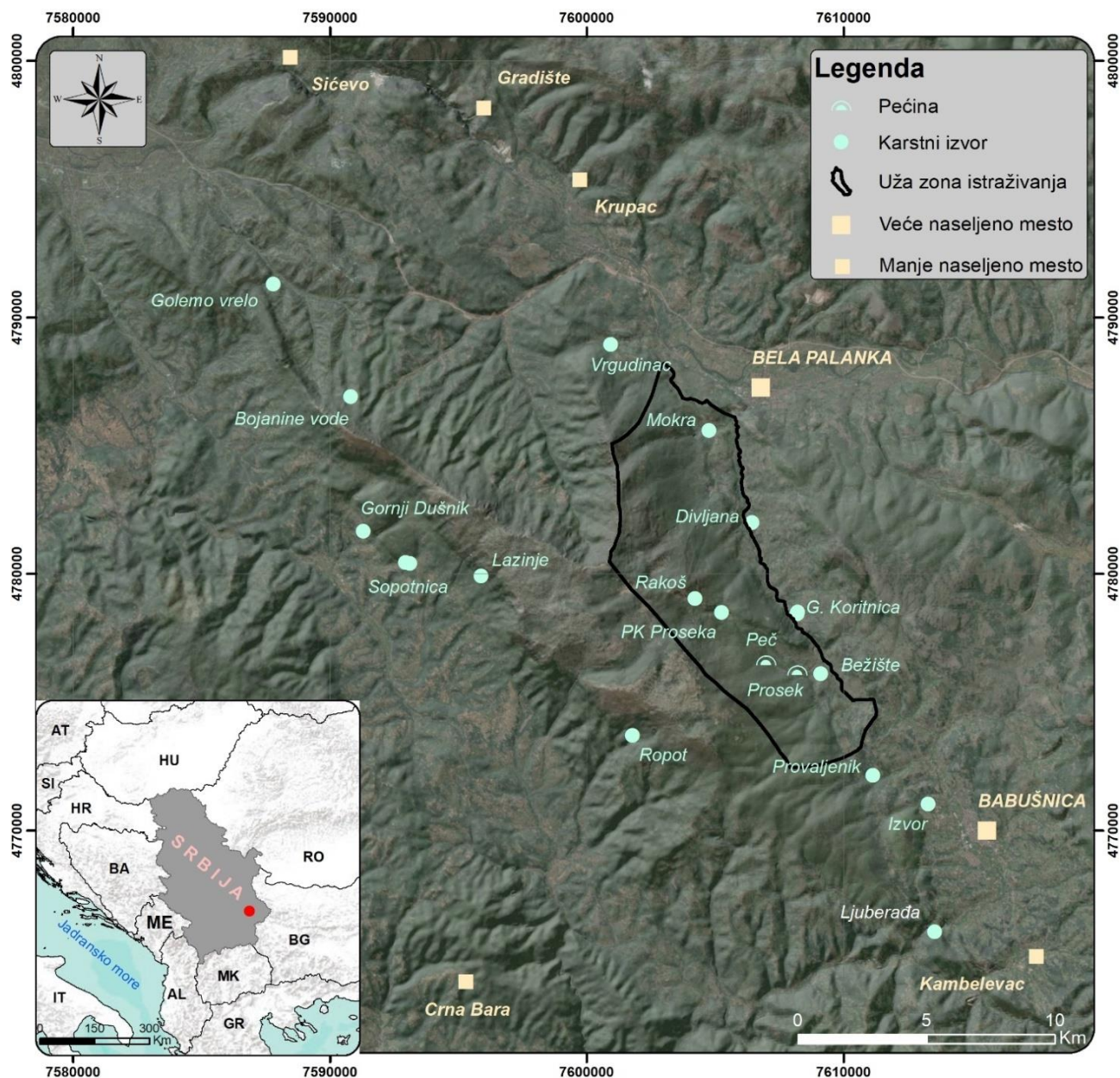
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	god
1	52,9	49,6	51,6	59,8	72,3	65,7	54,4	52,6	53,3	59,7	56,0	52,8	680,9
2*	42,8	41,6	43,4	55,3	64,2	62,6	47,0	45,0	58,9	56,3	49,7	54,3	621,3
3	39,4	38,6	46,9	57,4	68,9	52,8	46,2	38,7	52,6	51,5	50,0	50,8	593,8

*1992-2016. godine

Tabela 2. Srednje mesečne i godišnje vrednosti temperature vazduha (°C) za period 1991-2018. godine, za klimatološke stanice „Babušnica“-1, „Bela Palanka“-2 i „Niš“-3 (RHMZ, Beograd)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	god
1	-0,4	1,4	5,8	10,9	15,7	19,5	21,3	21,1	16,1	11,0	5,7	0,8	10,7
2*	0,5	2,3	6,5	11,6	16,3	19,9	21,9	21,8	16,6	11,7	6,7	1,9	11,5
3	1,2	3,3	7,7	12,7	17,5	21,2	23,2	23,3	18,3	13,1	7,8	2,4	12,6

*1992-2016. godine



Slika 1. Geografski položaj Suve planine i uže oblasti istraživanja

Rečna mreža je razvijena samo u podnožju Suve planine. Prihranjivanje površinskih rečnih tokova na račun pražnjenja karstne izdani uslovalo je i formiranje karstnog režima površinskih tokova na istražnom terenu. Izražena je amplituda između minimalnih i maksimalnih proticaja, kao i postojanje bujičnih tokova i pojava poplavnih talasa u periodima otapanja snežnog pokrivača ili pri jakim pljuskovima. U okviru užeg područja

istraživanja postoje samo 2 stalna površinska toka, Mokranjska reka i Koritnička reka. Postoji nekoliko povremenih tokova koji su (svi) aktivni samo za vreme dužih i obilnijih prolećnih padavinskih epizoda, kombinovanih sa otapanjem snega.

Uže područje istraživanja uticaja tla i epikarsta na osnovni sastav tj. kvalitet podzemne vode obuhvatilo je

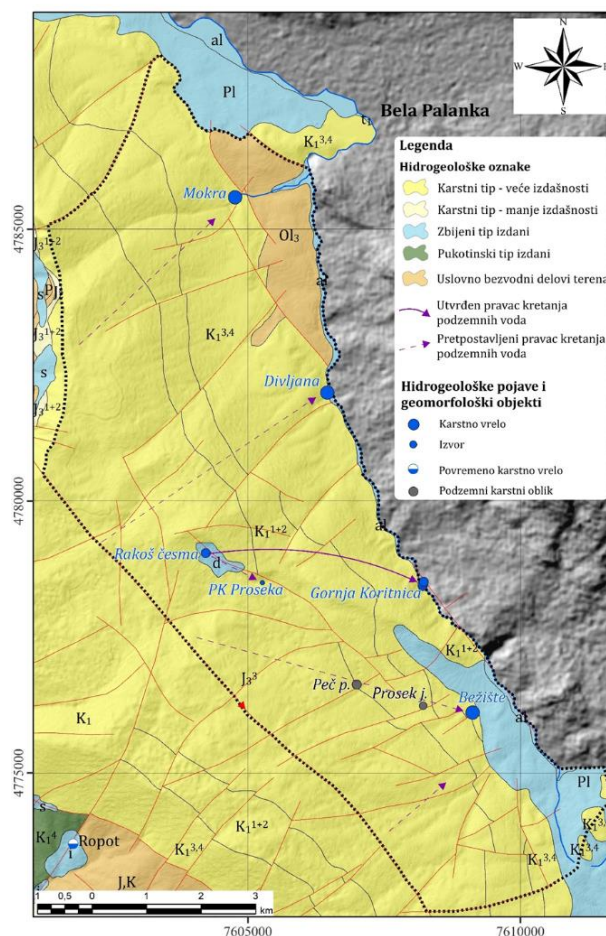
istočni deo Suve planine, a predstavljeno je oblašću prihranjivanja karstnih vrela Mokra, Divljana, Gornja Koritnica i izvora Bežište. Geološka građa terena je složena i posledica je višestrukih tektonskih događaja i pokreta koji su uzrokovali nastanak antiklinale pravca pružanja severozapad-jugoistok, koja tone ka jugoistoku (Petrović et al, 2023; Petrović & Marinović, 2021; Petrović, 2020; Vujisić et al, 1971). Krečnjaci različitog stepena čistoće, uz mestimično prisustvo dolomita, izgrađuju krila antiklinale, sa padom slojeva ka severoistoku i jugozapadu. Na istražnom području izdvojeni su svi tipovi izdani, ali i uslovno bezvodni delovi terena (slika 2).

3. METODOLOGIJA

Hidrogeološko kartiranje obavljeno je najvećim delom tokom letnjih meseci 2018. godine, paralelno sa geomorfološkim istraživanjima. Obuhvatilo je definisanje karakteristika epikarsta, na otvorenim izdancima stena i usecima, određivanje debljine, sastava, oblasti prostiranja, i pripremu podataka za korelaciju sa podacima prikupljenim daljinskom detekcijom i geomorfološkim istraživanjima.

Hidrogeološko kartiranje je izvršeno radi definisanja karakteristika epikarsta tj. radi korelacije sa podacima koji su prikupljeni i analizirani tokom primene daljinske detekcije i geomorfoloških istraživanja, a na osnovu kojih je kreirana karta potencijala razvoja epikarsta. Na istočnim padinama Suve planine kategorije epikarsta izdvojene su na repnim profilima u okviru uže istražnog prostora, izdvojene su 4 kategorije ove potpovršinske zone (Petrović et al, 2022; Petrović, 2020): 1-slabo razvijen epikarst (max debljine 0,50 m do 1 m, debljina tla je do 10 cm), 2-razvijen epikarst (max debljine 1 m do 1,5 m, debljina tla je 10-30 cm), 3-srednje razvijen epikarst (max debljine do 3 m, debljina tla je 10-30 cm) i 4-izuzetno razvijen epikarst (max debljine preko 3 m, debljina tla je do 10-50 cm). Izdvajanje je pre svega izvršeno prema debljini zone, zatim prema debljini zemljišnog sloja koji se nalazi na površini i prisustvu i tipu vegetacije.

Definisanje stenskog sastava, na ulazu i izlazu iz karstnog izdanskog sistema, izvršeno je petrološkim analizama obavljenim u laboratoriji Departmana za mineralogiju, kristalografiju, petrologiju i geochemiju, RGF-a. Uzorci stene za petrološke analize su prikupljeni u okviru uže istražnog prostora na istočnim padinama Suve planine, tokom izvođenja terenskih istraživanja.



Slika 2. Hidrogeološka karta užeg istražnog područja, istočne padine Suve planine (podloga OGK list Bela Palanka, Vujisić et al, 1971)

U postupku makroskopskog pregleda uzorci su testirani sa razblaženom hlorovodoničnom kiselinom (HCl) i urađena je brza metoda za utvrđivanje sadržaja CaCO_3 u steni – kalcimetrija. Mineralni sastav ispitivanih sedimentnih stena određivan je ispitivanjem petrografskih preparata na polarizacionom mikroskopu. Korišćena je kompleksna konfiguracija nekoliko uređaja koji su među sobom softverski povezani. To su polarizacioni mikroskop za propuštenu svetlost marke Lajka (tip DMLSP) na kome se nalazi digitalna kamera Lajka (tip DC300). Ispitivanja petrografskih preparata sedimentnih stena uključila su osim određivanja mineralnog sastava, određivanje strukture, orijentacije zrna, kao i neke od teksturnih karakteristika. Analize su poslužile kod definisanja čistoće krečnjaka, čime je bolje definisan potencijal karbonatnih stena za karstifikaciju i razvoj epikarsta, a zatim je definisana i sredina u kojoj je

krečnjak formiran, radi boljeg definisanja uslova nastanka karbonata na ovom prostoru, a indirektno i uslova u kojima je nastala pećina Peč.

Determinacija sadržaja svih važnijih makro i mikro elemenata koji ulaze u sastav zemljišta izvršena je standardnim metodama u laboratoriji Hemijskog fakulteta (Smiljković, 2019). U okviru istraživanja zemljišnog pokrivača u laboratoriji su određeni parametri: vlažnost zemljišta, mineralni sastav, sadržaj organske supstance zemljišta, kao i fizičko-hemijski procesi koji se u njemu odvijaju, a koji utiču na menjanje osobina površinskih (podzemnih) voda. Osim toga ciljevi istraživanja fizičko-hemijskog sastava zemljišta bili su da se:

- uradi tehnička analiza uzoraka i da se utvrdi količina organske supstance u uzorcima;
- utvrdi da li je zemljište kontaminirano nekim teškim metalom.

Elementarnom analizom određen je sadržaj vodonika, azota, sumpora i organskog ugljenika. Priprema uzoraka za analize je obavljena pomoću mikrotalasne digestije (ETHOS1-Advanced Microwave Digestion Milestone). Merenja su obavljena na aparatu Vario EL III, CHNOS Elemental Analyzer, GmbH. Sadržaj makro- i mikro-elemenata je određen metodom optičke emisije spektrometrije sa indukovanom kuplovanom plazmom (ICP-OES) na instrumentu Thermo Scientific Cap 6500 Duo ICP (Thermo Fisher Scientific Cambridge UK). Tom prilikom su korišćeni standardi za pripremu standardne serije (Multi-Element Plasma Standard Solution 4, Specpure®; Silicon, plasma standard solution, Specpure®, Si 1000 µg/ml; SS-Low Level Elements ICV Stock (10 mg/l: Ag, Al, As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Th, Tl, U, V, Zn).

Hemijske analize vode, na mesečnom i kvartalnom nivou izrađivane su kao skraćene terenske u okviru laboratorija Departmana za hidrogeologiju i Centra za hidrogeologiju karsta. Zatim je izvršeno utvrđivanje sadržaja mikrokomponeenti u određenim uzorcima voda u Laboratoriji Hidroelektrane na Trebišnjici, Trebinje; Služba za laboratorijska ispitivanja, Sektor za razvoj i istraživanje, Direkcija za proizvodnju i tehničke poslove (Laboratorija HET-a), kao i u Laboratoriji za ICP-OES, Hemijskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu (HF, UB).

4. REZULTATI I DISKUSIJA

Sadržaj kalcita u uzorcima stena prelazi 88% (u oblasti pećine Peč preko 97%), stoga ne čudi jako izražena

karstifikacija i formiranje kanala i kaverni metarskih dimenzija. Takođe, može se zaključiti da sastav stena na istočnim padinama Suve planine pogoduje procesu karstifikacije i njegovom brzom napredovanju, naročito u kombinaciji sa tektonskim pokretima koji su izazvali izdizanje antiklinale i pucanje slojeva krečnjaka, samim tim i nastanak epikarsta na ovom terenu nije upitan.

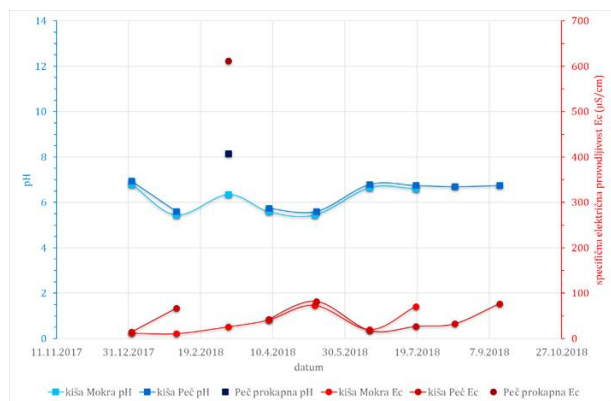
Procesi i reakcije koje se odvijaju u sistemu voda-zemljište-epikarst (stena) u nadizdanskoj zoni karstne izdani se mogu pratiti kroz rezultate analiza kvaliteta (sastava) vode koja u ovim procesima učestvuje, a čije prisustvo i omogućava da se određene hemijske i biohemijske reakcije odigraju u podzemlju. Voda u karstni sistem dospeva iz spoljašnosti u vidu infiltriranih padavina ili u vidu poniranja površinske vode, što je u slučaju Suve planine jako retko.

Kišnica se u atmosferi obogaćuje neorganskim i organskim materijama pre svega rastvaranjem gasova (NO_x, CO₂, SO_x...) i rastvaranjem materijala koji se nalazi u česticama prašine i čađi. Kišnica uglavnom ima niže vrednosti pH od 5,4 do 6,9. Srednji sadržaj rastvorenih mineralnih materija, proračunat iz vrednosti specifične električne provodljivosti (US EPA, 1992), je nizak i iznosi od 7 do 53 mg/l, a niže vrednosti su povezane sa periodima izlučivanja većih količina padavina (prolećni i letnji pljuskovi).

Vrednosti pH i specifične električne provodljivosti (Ec) koje su izmerene u prokapnoj vodi pećine Peč pokazale su da postoje značajne promene u kvalitetu vode koja se filtrirala kroz zemljište debljine manje od 10 cm, koje je imalo značajan sadržaj organskih ostataka biljaka, pa i životinjskog sveta, kao i epikarst i karstifikovani krečnjak u povlati pećinske tavanice, u odnosu na kvalitet (osnovi sadržaj jona) kišnice. U slučaju stena koje su sačinjene od karbonata, u kojem dominira kalcit, pH kišnice će se odmah nakon infiltracije sa početnih vrednosti pH=5-6 u kontaktu sa krečnjačkim stenama povećati na pH=8-10 (Sparks, 1995). Sposobnost zemljišta za razmenljivu adsorpciju jona se povećava sa povećanjem pH rastvora sa kojim se zemljište nalazi u ravnoteži. Tako se pri povećanju pH sredine od 6-11 kapacitet razmene jona može povećati 2-3 puta (Jakovljević et al, 2000), pa je navedeno povećanje izmerenih parametara sastava prokapne vode očekivano (slika 3).

Voda u vidu kišnice, prilikom infiltriranja u podzemlje ima niske vrednosti pH (5,45-6,95), i tokom filtracije kroz stene se menja i počinje da odražava sastav sredine kroz koju se kreće, pa je tako pH vrednost u prokapnoj

vodi od 7,42 do 8,42. Fizičko-hemijski parametri kišnice, koja je bila prikupljena na lokacijama vrelo Mokra i pećina Peč, na istočnim padinama Suve planine, su bili definisani u slučaju kada je bilo dovoljno vode za vršenje merenja ili hemijske analize. Merenja su pokazala da je prosek pH vrednosti 6,2 za obe lokacije, međutim, malo niže vrednosti pH kišnice su bile beležene na lokaciji vrelo Mokra (slika 3).



Slika 3. Vrednosti pH i specifične električne provodljivosti u kišnici i prokapnoj vodi pećine Peč (prema Petrović, 2020)

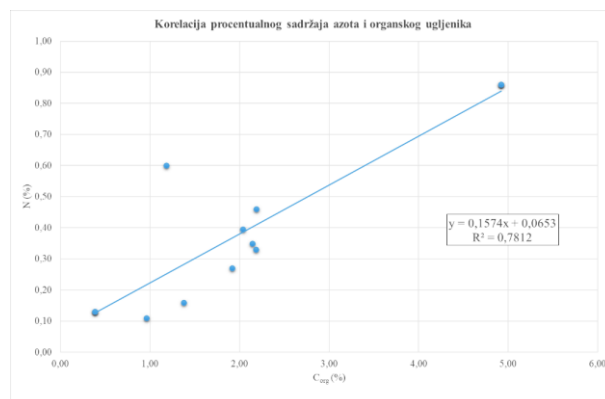
Kasniji procesi koji se odvijaju u izdani: retardacija i/ili izmena jona, adsorpcija/desorpcija, apsorpcija i difuzija, koji se odvijaju između jona u „novoj“ vodi (infiltrirane kišnice) sa jedne strane i podzemne vode koja se već nalazi u izdani tj. krečnjačkih stena sa druge strane, će dovesti do ujednačavanja vrednosti pH u vodi koja na kraju ističe iz karstnih vrelo.

Sadržaj vlage je u uzorcima zemljišta bio u opsegu od 2,62% do 7,72%, dok u referentnom sedimentu iznosi svega 0,10%. Sediment ima za red veličine niži procenat vlage od zemljišta, svega, 0,10%, što može biti indikativno za odsustvo higroskopskih komponenti koje zadržavaju vlagu. Ova pretpostavka je i potvrđena rezultatom koji pokazuje da je referentni uzorak sedimenta 99,90 % sačinjen od karbonata. Vrednosti za sadržaj pepela u rasponu od 62,94% do 90,71% ukazuju na to da u zemljištu očekivano dominira mineralna komponenta. Sediment ima najniži procenat pepela u poređenju sa ostalim uzorcima 56,83%, što se objašnjava činjenicom da prilikom zagrevanja na preko 800°C dolazi do razgradnje karbonata, od kojih je sediment sačinjen, na okside uz oslobađanje CO_2 . Vrednosti sadržaja karbonata su u opsegu od 17,46% do 80,40%. Primetan je viši sadržaj karbonata u uzorcima koji su uzeti u zoni pećine Peč, kao i u oblasti jame Prosek (slika

2), što se može objasniti time da je zemljište nastalo i pod jakim uticajem erozije krečnjačkih stena i razloženog kalcita koji završava u zemljištu. Procentualni udeo vodonika i azota se kreće u opsegu od 0,58% do 1,74%, odnosno od 0,11% do 0,86%.

U uzorcima iz podnožja Suve planine, u okolini vrelo Bežište, Divljana i Mokra uočava se znatno niži sadržaj karbonata, nego u uzorcima sa lokacija pećine Peč i Bukovice. Uzrok se može pronaći u debljem sloju zemljišta koji je prisutan na tim lokacijama, kao i u činjenici da je tlo nastalo na mestu pliocenske i oligocenske sedimentacije klastičnih materijala, koja je procesima spiranja sa hipsometrijski nižih delova Suve planine. Samim tim u sastavu zemljišta na tim nižim lokacijama prisustvo karbonatne komponente je umanjeno, jer nije ni bila u sastavu naslaga koje su se formirale u mlađim geološkim periodama.

Sadržaj azota pozitivno koreliše sa sadržajem organskog ugljenika (slika 4), što pokazuje da je azot uglavnom vezan u organskoj supstanci, koja je prisutna u sastavu zemljišta.



Slika 4. Korelacija sadržaja azota i organskog ugljenika

Sadržaj ukupnog ugljenika (C) posle uklanjanja karbonata je u opsegu od 0,98% do 12,42%. Veći procentualni sadržaj ukupnog ugljenika (C) u uzorku uzetom iznad pećine Peč povezan je sa većom količinom organske supstance, koja je indikovana ne samo na osnovu povećanog sadržaja organskog ugljenika, već je i vizuelno primećena, budući da su ovi uzorci imali znatno više biljnih i životinjskih ostataka.

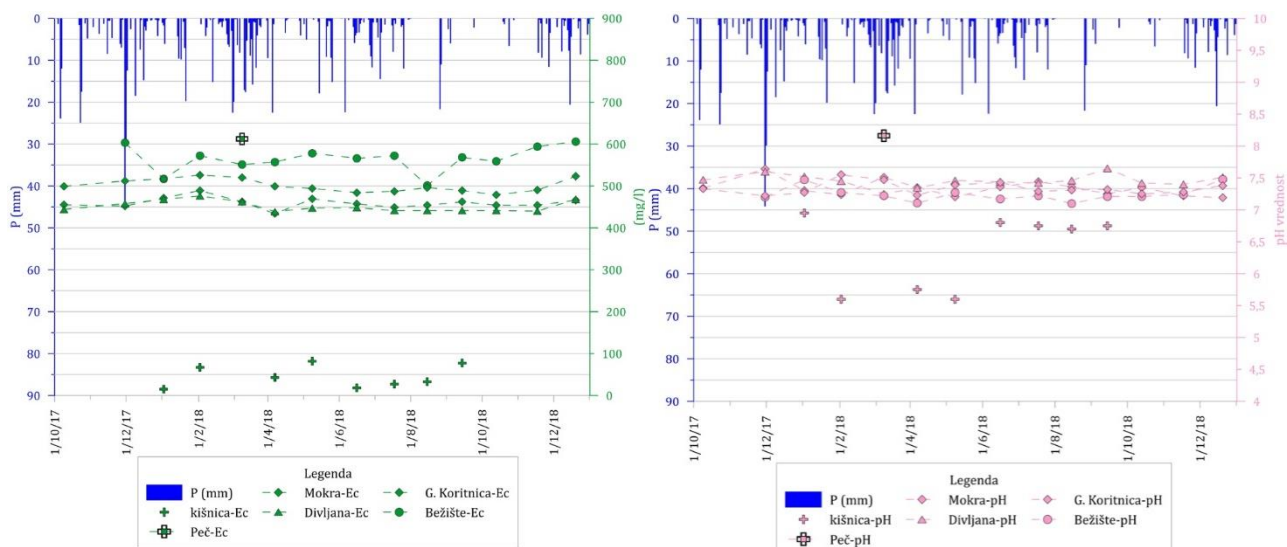
Sadržaj sumpora je u svim uzorcima ispod granice detekcije i ukazuje na odsustvo sulfatnih i sulfidnih minerala, kao i na odsustvo zagađenja sumpornim organskim jedinjenjima. Vrednosti sadržaja organskog

ugljenika (C_{org}) su u opsegu od 0,38 % do 4,92 %. U uzorku sedimenta nije bilo moguće odrediti sadržaj organskog ugljenika, budući da je on skoro 99,9% karbonat koji se tokom kisele digestije rastvorio.

Vrednosti parametara koje su merene u prokapnoj vodi pećine: Ec od 204 do 513 $\mu\text{S}/\text{cm}$ i pH od 7,42 do 8,42 (slika 5), su konstantno bile mnogo više od vrednosti izmerenih u kišnici: $\text{Ec} < 100 \mu\text{S}/\text{cm}$ i $\text{pH} < 6$. Vrednosti pH i Ec izmerene u procednoj vodi, upoređene sa vrednostima u kišnici ili u podzemnoj vodi, u stvari pokazuju da je voda prošla kroz izmenjenu zonu koji ju je obogatio mineralnim materijama, a koji nije u potpunosti diktiran sadržajem kalcijuma, magnezijuma i bikarbonata.

Proces izjednačavanja „kiselosti“ vode, u vrelima sa dubljim zaleganjem kanala duž kojih se podzemna voda duže kreće (Mokra i Divljana), je intenzivniji i konstantan.

Vrednosti Ec u procednoj vodi su za 32% više od vrednosti u podzemnoj vodi karstnih vrela Mokra i Divljana, a za oko 15% su više nego u podzemnoj vodi karstnih vrela Gornja Koritnica i Bežište, dok su u odnosu na vrednosti Ec u kišnici više čak 13 puta, tako da se može zaključiti da se u tlu i epikarstu odvija intenzivno bogaćenje infiltrirane vode mineralnim materijama (slika 5). Kišnica koja se infiltrira i prihranjuje karstnu izdan je samo malo izmenjenog sastava, ukoliko uporedimo lokacije Mokra i pećina Peč, što ukazuje da prokapna voda u pećini Peč ima znatno izmenjen sastav baš usled prolaska kroz epikarst i tanak sloj karstifikovanog krečnjaka (< 9 metara). Vrednosti tri količinski najzastupljenija jona (Ca^{2+} , Mg^{2+} i HCO_3^-) u procednoj i podzemnoj vodi na karstnim vrelima (Mokra, Divljana, Bežište i Gornja Koritnica) ne razlikuju se mnogo, pa se na osnovu ovoga može zaključiti da je u procednoj vodi sadržaj drugih (mikro) elemenata veći od sadržaja istih tih elemenata u podzemnoj vodi koja se drenira na vrelima u podnožju istočnih padina Suve planine (slike 6, 7 i 8).



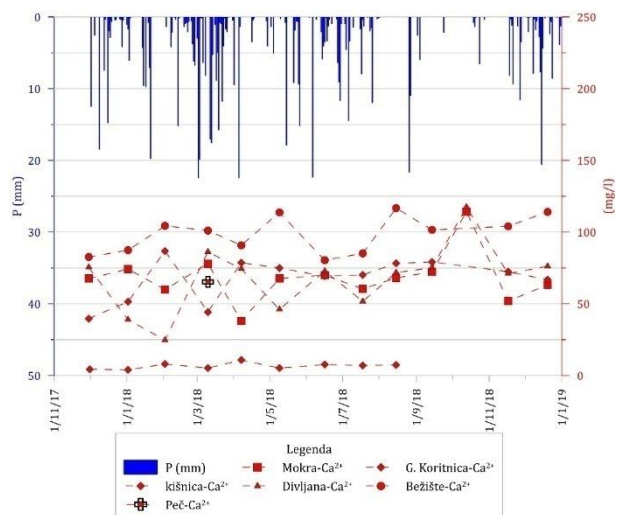
Slika 5. Vrednosti Ec i pH u kišnici, prokapnoj vodi i podzemnoj vodi karstnih vrela u poređenju sa padavinama (prema Petrović, 2020)

Rezultati istraživanja su potvrdili niske vrednosti koncentracije kalcijuma [Ca^{2+}] $_{\text{max}} = 10,8 \text{ mg}/\text{l}$ u kišnici sa lokacije pećine (slika 6) i magnezijuma [Mg^{2+}] $_{\text{max}} = 2,7 \text{ mg}/\text{l}$ u kišnici sa lokacije Mokra (slika 7), kao i bikarbonata [HCO_3^-] $_{\text{max}} = 2,7 \text{ mg}/\text{l}$, takođe, na lokaciji Mokra (slika 8). Koncentracije gvožđa [Fe_{total}] u kišnici su se kretala od 0,09-0,24 mg/l , dok su koncentracije

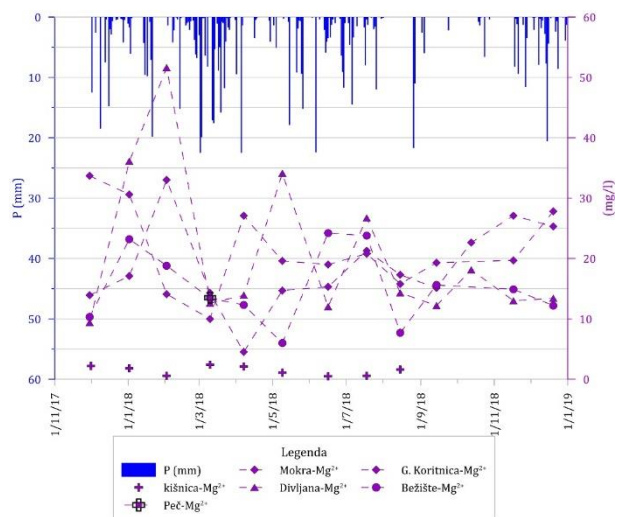
sulfata (SO_4^{2-}) bile niže od 5 mg/l , što je granica detekcije uređaja koji je upotrebljen za analize.

Koncentracije kalcijuma i magnezijuma u procednoj vodi uvećane su 6 odnosno 5 puta respektivno (slike 6 i 7), dok je koncentracija bikarbonata uvećana i do 12 puta u odnosu na srednje koncentracije istih jona, koje su

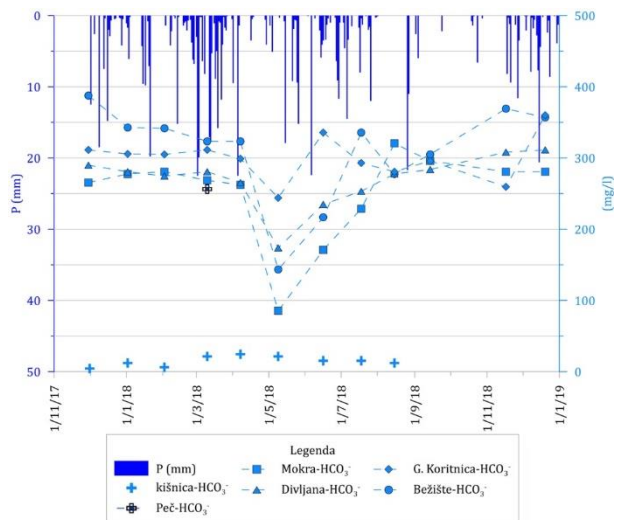
detektovane u kišnici (slika 8). Koncentracije gvožđa (0,23 mg/l) i sulfata (<5 mg/l), koje su detektovane u uzorku procedne vode, ne pokazuju veća odstupanja od vrednosti koje su zabeležene u podzemnoj vodi sa karstnih vrela.



Slika 6. Koncentracije kalcijuma u kišnici, prokapnoj vodi i podzemnoj vodi karstnih vrela (prema Petrović, 2020)



Slika 7. Koncentracije magnezijuma u kišnici, prokapnoj vodi i podzemnoj vodi karstnih vrela (prema Petrović, 2020)



Slika 8. Koncentracije bikarbonata u kišnici, prokapnoj vodi i podzemnoj vodi karstnih vrela (prema Petrović, 2020)

Uvećanje koje je zabeleženo kod vrednosti specifične električne provodljivosti u prokapnoj vodi, ne potiče samo od uvećanja koncentracije tri količinski najzastupljenija jona, već najverovatnije potiče i od drugih elemenata i mikroelemenata koji ulaze u sastav procedne vode.

Na vrelu Bežište nije bilo dovoljno vremena za alkalizaciju infiltrirane kišnice, što pokazuje postojanje uticaja epikarsta, koji je detektovan na znatnom delu površine koja predstavlja oblast prihranjivanja vrela Bežište. Sastavom epikarsta, naravno da dominira krečnjak, međutim, sekundarni sastojci utiču na smanjenje pH vrednosti vode, a usled povišenog sadržaja ugljen-dioksida, kao i usled postojanja organske materije u epikarstu. Ukoliko uzmemo u obzir i sastav analiziranog zemljišta (Petrović, 2020), opet možemo uočiti povišene sadržaje određenih elemenata, koji utiču na povećanje specifične električne provodljivosti u podzemnoj vodi vrela Bežište.

Koncentracija gvožđa u uzorcima zemljišta dostiže 54 mg/g, koncentracija kalijuma skoro 20 mg/g, a natrijuma 4 mg/g. Rezultati hemijskih analiza pokazuju i da su u vodi karstnog vrela Bežište koncentracije kalcijuma u proseku za 10-15% više od onih koje su zabeležene u podzemnoj vodi sa vrela Mokra i Divljana. Razlika u koncentraciji je posledica pojačanog rastvaranja kalcita iz krečnjaka u otvorenoj epikarstnoj izdani, kojom se delimično prihranjuje izdan koja se drenira na vrelu Bežište. Pojačano rastvaranje krečnjaka dešava se usled

povišene koncentracije ugljen-dioksida koji potiče iz zemljišta, kao i usled potpune otvorenosti zone prihranjivanja ovog vrela. Koncentracije magnezijuma na vrelu Bežište su u proseku niže od onih na vrelima Mokra, Divljana i Gornja Koritnica, a niže vrednosti koncentracija Mg^{2+} se, takođe, mogu objasniti dužinom boravka vode u podzemlju, pošto je bogaćenje podzemne vode jonima magnezijuma sporije usled manje rastvorljivosti magnezijum karbonata. Koncentracije bikarbonata u podzemnoj vodi vrela Bežište su uglavnom više, a pokazuju i najveću vrednost standardne devijacije indikujući da je mešanje podzemne vode iz epikarstne i karstne izdani intenzivnije. Ukoliko uzmemo u obzir i sastav zemljišta, opet možemo uočiti povišene sadržaje nekih elemenata, koji mogu uticati na povećanje specifične električne provodljivosti u podzemnoj vodi vrela Bežište. Koncentracija gvožđa u uzorcima zemljišta dostiže 54 mg/g, koncentracija kalijuma skoro 20 mg/g, a natrijuma 4 mg/g (Petrović, 2020).

Veličina „rezervoara“ koji se prazni na Bežištu i Gornjoj Koritnici je manja, pa je uticaj padavina i epikarsta na kvalitet podzemne vode veći, ali je znatno izraženiji uticaj epikarsta na podzemnu vodu vrela Bežište. Vrednosti pH i specifične električne provodljivosti merene na vrelu Bežište se razlikuju od vrednosti na drugim vrelima. Prosečno najniža vrednost pH je bila izmerena u vodi sa vrela Bežište, dok je beležena najviša vrednost Ec, a koncentracija magnezijuma je u proseku najniža na ovom vrelu (Slike 5-8). Navedene činjenice, između ostalog, pokazuju da podzemna voda koja ističe na ovom vrelu najkraće boravi u podzemlju.

Brzina filtracije podzemne vode kroz epikarstnu izdan, proračunata na osnovu opita trasiranja (Petrović, 2022; Petrović, 2020), manja je od brzine cirkulacije kroz karstnu izdan. Fiktivna brzina kretanja vode kroz zonu epikarsta je bila u opsegu od 0,0041 m/s do 0,006 m/s, a virtuelna brzina kretanja podzemne vode kroz karstnu izdan koja se drenira na Gornjoj Koritnici je bila 0,048 m/s (Petrović J, 1958). Međutim, vrednosti filtracije vode i kroz epikarstnu izdan i kroz karstnu izdan su u skladu sa vrednostima koje su dobijene za karstnu izdan na prostoru karstnih terena istočne Srbije (Stevanović, 1991).

5. ZAKLJUČAK

Podzemne vode na istočnim padinama Suve planine, u okviru zone istraživanja nakon infiltriranja kreću se kroz karstifikovane karbonatne stene, ka lokalnom erozionom bazu (izvorima): Rakoš česma (R), veći broj

povremenih epikarstnih izvora poput PK Proseka i ka regionalnom erozionom bazu (vrelima u podnožju): Bežište (B), Gornja Koritnica (GK), Divljana (D) i Mokra (M) (slike 9 i 10). Na ovom putu voda se nakon prvobitne infiltracije atmosferskih padavina nekoliko puta pojavljuje na površini i ponovo ponire ili se vraća u atmosferu putem procesa evaporacije ili evapotranspiracije.

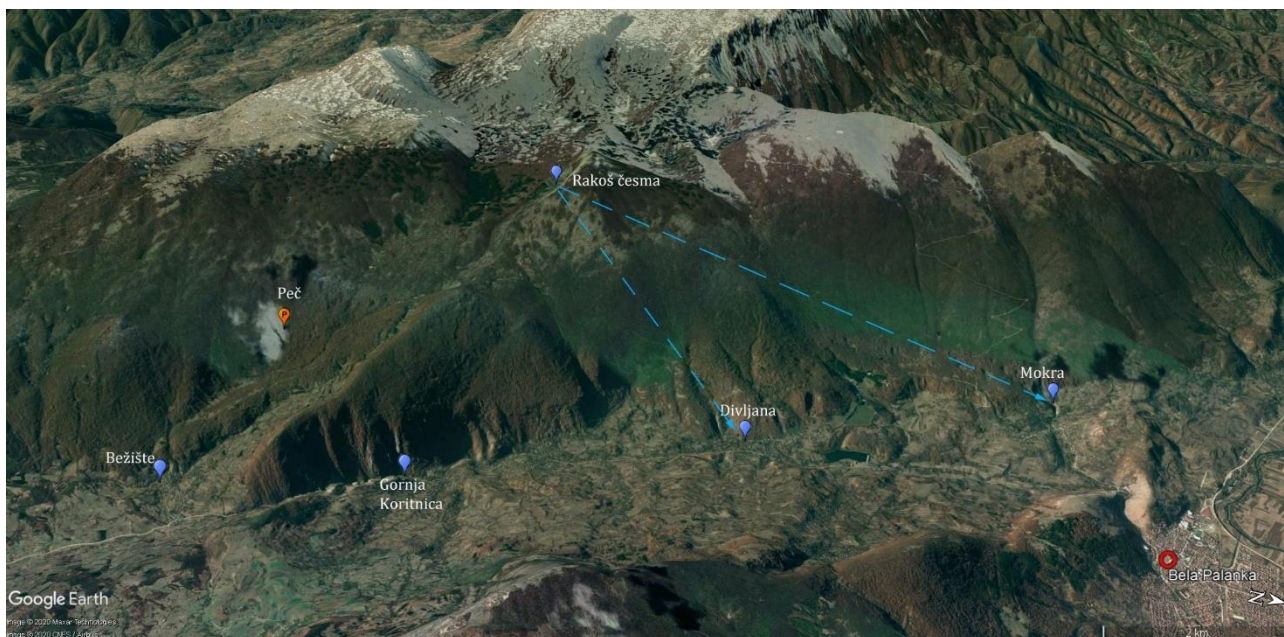
Cirkulacija podzemne vode se odvija i od mesta poniranja kratkog površinskog toka koji nastaje od Rakoš česme ka podnožju Suve planine. Opiotom trasiranja (Petrović J, 1958), dokazana je povezanost ponirućeg toka Rakoša i vrela u Gornjoj Koritnici (slika 9). S obzirom na činjenicu da je najveći broj ruptura na istočnim padinama Suve planine pravca pružanja JZ – SI i ZJZ – SI, može se zaključiti da je kretanje podzemnih voda akumuliranih u karstnoj izdani usmereno od ose antiklinale ka istoku i severoistoku. Dva najjača i najstabilnija vrela Mokra i Divljana su upravo locirana na mestu susreta regionalnog koritničkog raseda, longitudinalnog pravca pružanja, i lokalnih transverzalnih raseda (slika 10). Isticanje podzemne vode na vrelima Gornja Koritnica i Bežište je kontrolisano rupturama lokalnog karaktera, koje su pravca pružanja 60° do 90° . Celokupni karstni sistem istočnih padina Suve planine ima blagi nagib ka jugoistoku, jer i osa antiklinale tone u tom smeru.

Kroz zemljište migriraju i cirkulišu različite supstance u obliku pravih i koloidnih rastvora, a u njemu se odvija i mnoštvo hemijskih reakcija. Kao rezultat kretanja supstanci i biološke aktivnosti organizama u zemljištu se formiraju slojevi određenih fizičko-hemijskih i bioloških osobina. Na taj način u zemljištu se odvija prvi korak u promeni sastava infiltrirane površinske vode i njen postepen prelaz u podzemnu vodu.

Prokapna voda je značajno izmenjenog sastava u odnosu na sastav kišnice, što se ogleda u uvećanim vrednostima pH, specifične električne provodljivosti, koncentracije kalcijuma, magnezijuma i bikarbonata. Promene su najvećim delom nastale tokom filtracije vode kroz zemljišni sloj, kao i kroz epikarst u čijem sastavu su sadržane određene količine zemljišnog materijala. U zemljištu se dešavaju i određeni biohemijski procesi usled delovanja živog sveta i produkata njihovog metabolizma (bogaćenje rastvora ugljen-dioksidom, azotnim jedinjenjima, huminskim kiselinama i sl.), tako da je proces izmene sastava infiltrirane vode intenzivan na jako malom rastojanju.



Slika 9. Pravci filtracije podzemne vode na istočnim padinama Suve planine (preuzeto iz Petrović, 2020)



Slika 10. Pravci filtracije podzemne vode na istočnim padinama Suve planine (preuzeto iz Petrović, 2020)

Određeni mikroelementi su zabeleženi u izuzetno niskim koncentracijama u podzemnoj vodi karstnih vrela ili nisu uopšte detektovani. Međutim, ukoliko koncentracije svih mikroelemenata u procednoj vodi i podzemnoj vodi uporedimo sa osrednjenim koncentracijama

mikroelemenata koje su detektovane u uzorcima zemljišta vidi se da su koncentracije određenih elemenata značajno opale. Sa druge strane je došlo do višestrukog povećanja koncentracija određenih mikroelemenata u podzemnoj vodi koja ističe na karstnim vrelima, u

odnosu na koncentracije koje su beležene u uzorcima zemljišta.

Porast pH i specifične električne provodljivosti, zajedno sa pratećim povećanjem sadržaja osnovnog jonskog sastava i mikroelemenata, ukazuje na značajne izmene sastava infiltrirane vode na samom ulasku u karstni izdanski sistem. Nakon nastavka filtracije kroz karstnu izdan, procesi rastvaranja krečnjaka koji obogaćuju sastav podzemne vode kalcijumom i magnezijumom sa jedne, a bikarbonatima sa druge strane, preuzimaju primat nad ostalim hemijskim procesima. Stoga podzemna voda na vrelima ima katjonski sastav u kojem potpuno dominira kalcijum (>85%ekv), magnezijum (~12%ekv), a u anjonskom bikarbonati (>95%), dok su kalijum+natrijum, sulfati i hloridi prisutni u koncentracijama koje ne prelaze 3%ekv.

ZAHVALNOST

Autori se zahvaljuju Ministarstvu za nauku, tehnološki razvoj i inovacije na obezbeđenju sredstava po Ugovoru br. 451-03-65/2024-03/200126

LITERATURA

- [1] Bakalowicz M., 2005: Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeology Journal*, Vol. 13, pp. 148–60
- [2] Ford D.C. & Williams P.W., 2007: *Karst Hydrogeology and Geomorphology*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, p. 562
- [3] Gunn J., 1985: A conceptual model for conduit flow dominated karst aquifers, in *Karst Water Resources* (eds. Gultekin Gunay, A. Ivan Johnson; Proceedings of the Ankara - Antalya Symposium, July 1985), IAHS Publ. no. 161, pp. 587-596
- [4] Jakovljević M., Blagojević S., Raičević V., 2000: Hemija i mikrobiologija voda, Univerzitet u Beogradu, Poljoprivredni fakultet, Beograd-Zemun, p. 89
- [5] Klimchouk A.B., 1995: Karst Morphogenesis in the epikarstic zone, *Cave and Karst Science*, Vol. 21, No. 2, Transactions of the British Cave Research Association, pp. 45-50
- [6] Klimchouk A.B., 2004: Towards defining, delimiting and classifying epikarst: Its origin, processes and variants of geomorphic evolution, *Speleogenesis and evolution of karst aquifers*, *The Virtual Scientific Journal*, pp. 1-13
- [7] Kogovšek J., 2010: Characteristics of percolation through the karst vadose zone, *Karst Research Institute ZRC SAZU*, Postojna, p. 168
- [8] Petrović B., 2020: Funkcionisanje i uticaj epikarsta na režim, bilans i kvalitet podzemnih voda istočnog dela karstnog sistema Suve planine, *Doktorska disertacija*, Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu
- [9] Petrović B., 2022: The Flow Conditions in the Epikarst Zone of a Karst Aquifer. Case Study: Suva planina Mt., East Serbia, *Proceedings of "Man and Karst 2022"*, *Speleologia*, ISBN: 978-88-947661-1-0
- [10] Petrović B., Marinović V., 2021: Primena diskretnog autoregresivno – krosregresivnog modela pokretnog preseka za prognozu dnevnih vrednosti izdašnosti vrela Mokra i Divljana, *Zapisnici Srpskog Geološkog Društva*, Srpsko geološko društvo, Beograd, ISSN: 0372-9966, pp. 1-14
- [11] Petrović B., Stevanović Z, Marinović V., Ignjatović S., 2022: Prostorna analiza epikarsta u okviru karstnog sistema istočnog dela Suve planine, XVI srpski simpozijum o hidrogeologiji sa međunarodnim učešćem, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, pp. 365-370, ISBN: 978-86-7352-380-4, Zlatibor
- [12] Petrović, B., Marinović, V. & Stevanović, Z. Characterization of the eastern Suva Planina Mt. karst aquifer (SE Serbia) by time series analysis and stochastic modelling. *Environ Earth Sci* 82, 222 (2023). <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10911-5>
- [13] Petrović J., 1958: Kraška vrela Suve planine i njihov značaj, *Zbornik radova Geografskog instituta PMF*, sv. 5, Beograd, pp. 45-60
- [14] Smiljković Ž., 2019: Geohemijska karakterizacija zemljišta sa istočnih obronaka Specijalnog rezervata prirode „Suva planina“, *Diplomski rad*, Hemijski fakultet, Univerzitet u Beogradu, p. 47
- [15] Sparks D., 1995: *Environmental Soil Chemistry*, Academic Press, Elsevier, p. 267
- [16] Stevanović Z., 1991: Hidrogeologija karsta Karpato-Balkanida istočne Srbije i mogućnosti vodosnabdevanja, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, p. 245

- [17] Trček, B., 2003: Epikarst zone and karst aquifer behaviour – A case study of the Hubelj catchment, Slovenia, Geološki zavod Slovenije, Ljubljana, p. 100
- [18] Trček B. & Krothe N., 2004: Oxygen isotope studies of major karst springs on the Mitchell plain (USA) and the Trnovski Gozd karst plateau (Slovenia), in: Epikarst (Jones, W., Culver, D. & J. Herman Eds.), Karst Waters Institute Special Publication 9, pp. 92–98, Charles Town
- [19] US EPA, 1992: APHA Standard Methods #2510
- [20] Williams P.W., Fowler A., 2002: Relationship between oxygen isotopes in rainfall, cave percolation waters and speleothem calcite at Waitomo, New Zealand, Journal of hydrology, New Zealand Hydrological Society, vol. 41, No 1, Christchurch, New Zealand, pp. 53-70
- [21] Williams P.W., 1983: The role of the subcutaneous zone in karst hydrology, Journal of Hydrology, 61, pp. 45-67

THE INFLUENCE OF THE SOIL AND THE EPIKARST IN SHAPING OF THE QUALITY OF THE KARST GROUNDWATER OF EASTERN PART OF THE SUVA PLANINA MOUNTAIN

by

Branislav PETROVIĆ¹, Živojin SMILJKOVIĆ², Veljko MARINOVIĆ¹

¹Faculty of Mining and Geology, Belgrade, Department of hydrogeology, Centre for hydrogeology of karst

²Environmental Protection Agency of the Republic of Serbia

Summary

Various substances, both as real and colloidal solutions, migrate and circulate through the soil, where numerous chemical reactions occur. As a result of this movement and the biological activity of organisms, layers with specific physico-chemical and biological properties are formed. This process represents the first step in altering the composition of infiltrating surface water as it gradually transitions into groundwater. Limestone dissolution is already quite intense in the surface zones of the limestone-epikarst, as evidenced by data collected from the Peč cave site in Suva Planina Mt. The rise in pH and specific electrical conductivity, along with an increase in the concentrations of basic ionic elements and microelements (primarily derived from the soil),

indicates substantial changes in the infiltrating water composition at the entrance to the karst system. As the water continues to filter through the karst outcrops and the karstified limestone below, processes of limestone dissolution and enrichment of the groundwater with calcium and magnesium, along with bicarbonates, become dominant. Thus, the groundwater emerging from the karst springs at the base of the eastern slopes of Suva Planina Mountain has a cationic composition primarily dominated by calcium (>85% eq) and magnesium (~12% eq), while bicarbonate anions exceed 95%, with other macrocomponents present at concentrations under 3% eq.

Key words: epikarst, soli, Peč cave, groundwater quality