

PRIMENA KARATA RANJIVOSTI U DEFINISANJU ZONA SANITARNE ZAŠTITE U KARSTU NA PRIMERU ZLOTSKOG IZVORIŠTA

Uroš MILIĆ, Vladimir ŽIVANOVIĆ, Igor JEMCOV
Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu

REZIME

Zakonskom regulativom, odnosno Pravilnikom o načinu određivanja i održavanja zona sanitarne zaštite izvorišta vodosnabdevanja (Službeni Glasnik RS, broj 92/08), vrši se preventivna zaštita podzemnih vodnih resursa, pri čemu se osim samih zona definišu i dozvoljene aktivnosti unutar njih. Prema pomenutom Pravilniku, zone sanitarne zaštite, odnosno njihov oblik i veličina uglavnom zavise od smera i brzine cirkulacije podzemnih voda. Vertikalno kretanje vode, odnosno zagađujuće supstance kroz nadizdansku zonu se ne uzima u obzir. Upravo se na proceni mogućnosti vertikalnog kretanja kontaminanata sa podzemnom vodom, odnosno zaštitnoj ulozi nadizdanske zone, bazira koncept ranjivosti podzemnih voda. S obzirom na složene karakteristike karstne sredine, do danas je za ove terene razvijen veliki broj metoda za ocenu ranjivosti, pri čemu su u radu primenjene, a potom i međusobno upoređene metode COP i PI. Ove metode su proistekle iz „Evropskog pristupa“ (COST 620), gde su date smernice za izradu metoda za ocenu ranjivosti podzemnih voda u karstnim terenima. Glavni parametri koji se analiziraju u definisanju ranjivosti podzemnih voda su: zaštitna uloga nadizdanske zone, uslovi koncentrisane infiltracije i padavine (prihranjivanje izdani). Cilj rada predstavlja razmatranje mogućnosti primene metoda za ocenu ranjivosti u zaštiti karstnog izvorišta, na primeru izvorišta Zlot koje se koristi za vodosnabdevanje Bora. U skladu sa dobijenim rezultatima, PI metoda je izdvojena kao reprezentativna, a potom je izvršena i korekcija oblika i veličina zona sanitarne zaštite prethodno definisanih važećim Pravilnikom.

Ključne reči: karst, ranjivost podzemnih voda, COP metoda, PI metoda, zone sanitarne zaštite

1. UVOD

S obzirom da podzemne vode imaju učešće od oko 75% u vodosnabdevanju stanovništva Srbije [14], jasno je da je ovaj resurs neophodno i adekvatno zaštititi. U cilju zaštite podzemnih voda sprovode se preventivne i remedijacione mere. Kako bi se izbegli skupi remedijacioni tretmani, čija je efikasnost u karstnim terenima izrazito limitirana, pravilna implementacija preventivnih mera zaštite predstavlja ključan faktor u očuvanju ovog značajnog prirodnog resursa. Izrada karata ranjivosti podzemnih voda u karstnim sredinama predstavlja važnu osnovu prilikom delinacije zona sanitarne zaštite.

U skladu sa trenutnom zakonskom regulativom [17], definisanje zona sanitarne zaštite u karstu vrši se na osnovu metoda fiksnog radijusa (zona neposredne zaštite) i vremena putovanja vode do vodozahvatnog objekta (zona uže zaštite), dok se šira zona zaštite poistovećuje sa ostatkom slivnog područja. Ovakav pristup može dovesti do značajnijih grešaka u uspostavljanu zona sanitarne zaštite iz razloga što se u dovoljnoj meri ne uzima u obzir zaštitna funkcija nadizdanske zone [13].

Pravilna delinacija zona sanitarne zaštite u karstnim terenima je veoma važna usled velike osetljivosti karstne izdani na zagađivanje. Tako da sam proces zaštite resursa treba da obuhvata izradu kvalitetne hidrogeološke karte, definisanje ranjivosti izdani, kao i definisanje pravaca i brzine filtracije podzemnih voda [9].

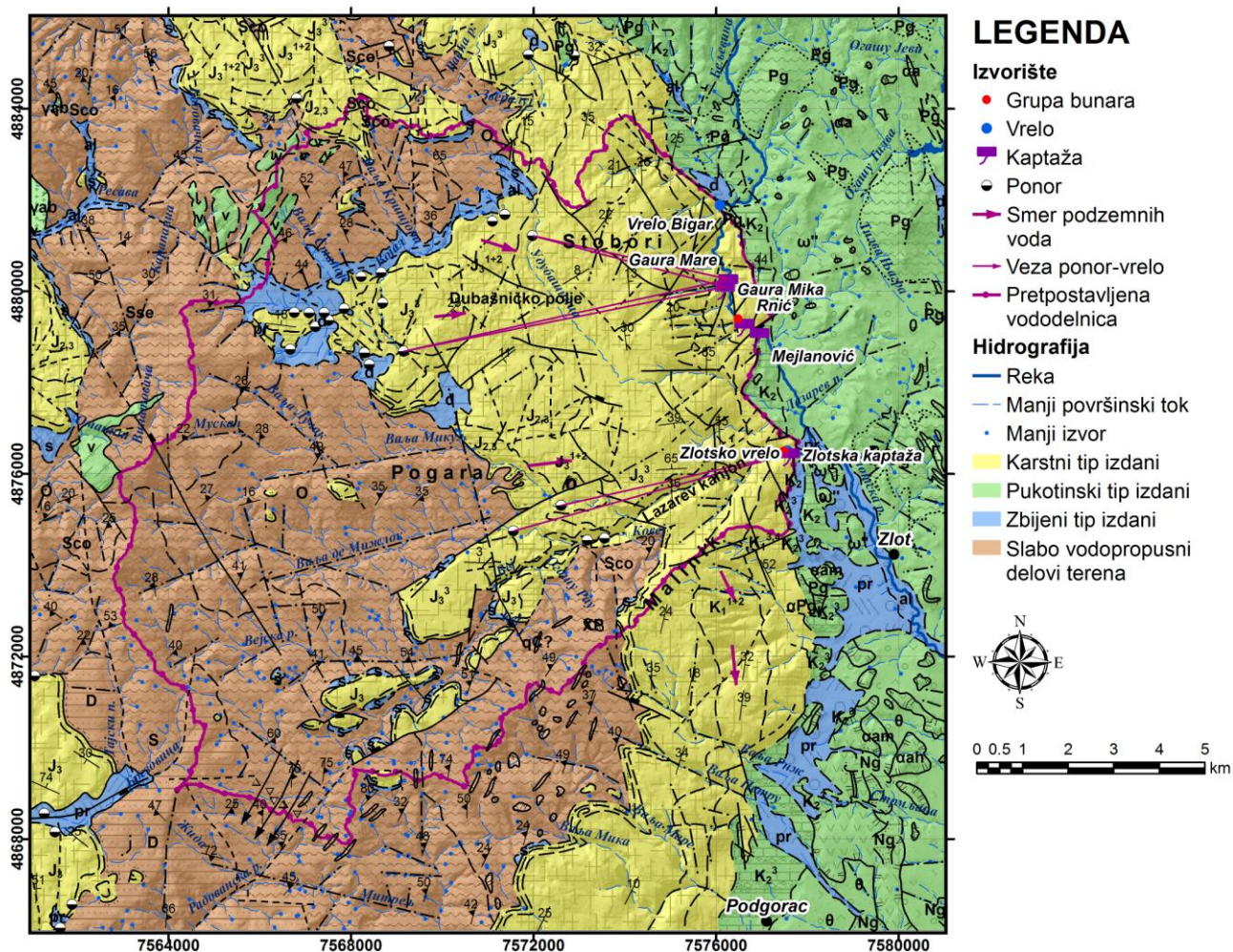
S obzirom da karstni tereni predstavljaju geološki fenomen koji se odlikuje znatnom anizotropijom (prisustvo velikih karstnih kanala), atenuaciona sposobnost na kontaminaciju ove sredine je izuzetno limitirana. Stoga je razvijen veći broj metoda za ocenu ranjivosti podzemnih voda u karstu: EPIK, COP, COP+K, PI, SINTACS, DRASTIC, TDM i dr. Napredan pristup u odnosu na pomenute parametarske

metode predstavlja TDM metoda [26][27]. Ova metoda je bazirana na ukupnom vremenu transporta čestica potencijalne zagađujuće supstance i uključuje veći broj ulaznih varijabli.

Od velike važnosti je adekvatno sprovesti izbor odgovarajuće metode za ocenu ranjivosti, koja će najbolje odgovarati geološkim, geomorfološkim, pedološkim, hidrološkim i hidrogeološkim uslovima na terenu, a sa druge strane biti ekonomski efikasna. Uporednom analizom metoda, sagledavanjem njihove saglasnosti sa karakteristikama slivnog područja i nivoa raspoloživih ulaznih podataka, izdvojene su COP i PI metode.

2. TEST PODRUČJE

Sliv Zlotskog izvorišta, kao deo sliva Beljevine i Zlotske reke, nalazi se u ataru sela Zlot, udaljenog 18 km jugozapadno od Bora u istočnoj Srbiji. Sa geološkog aspekta teren je predstavljen stenama od paleozojske do kvartarne starosti [2] [20] [21] [22]. Značajno rasprostranjenje imaju krečnjaci mezozojske starosti, koji predstavljaju karstni tip izdani velike hidrogeološke potencijalnosti. Na hidrogeološkoj karti (slika 1) prikazani su zastupljeni tipovi izdani na osnovu strukturnih tipova poroznosti.



Slika 1. Hidrogeološka karta područja istraživanja (prema [2] [20] [21] [22])

Značajan deo karte predstavljen je slabovodopropusnim stenama, paleozojske starosti. Pukotinski tip izdani se vezuje za stene Timočke eruptivne oblasti (piroklastiti,

vulkaniti i dr.) i predstavlja istočnu granicu slivnog područja. Zbijeni tip izdani karakteriše kvartarne sedimente i formiran je u aluvijumu, proluvijumu i deluvijumu.

Karstni tip izdani izgrađen dominantno od jurskih (J_2 , $J_{2,3}$, J_3^{1+2} i J_3^3) i krednih (K_1^{1+2} i $K_1^{3,4}$) sedimenata, krečnjaka i dolomitičnih krečnjaka debljine i do preko 1000 m, predstavlja najznačajniji hidrogeološki kolektor u široj okolini područja istraživanja [6].

Prihranjivanje ove izdani dominantno se vrši padavinama, kao i infiltracijom stalnih i povremenih površinskih tokova preko ponora, koji se inicijalno generišu na paleozojskoj podlozi. Pravci kretanja su utvrđeni ubacivanjem trasera u mnogobrojne ponore (ponor Vojala, Udubašnice, Valja de Mižloka, Valja Mikulja i dr.) i njihovom detekcijom na kaptiranim vrelima Gaura Mare i Gaura Mika, kao i nekaptiranom Zlotskom vrelu. Brzine filtracije podzemnih voda kreću se i do maksimalnih 0,1 m/s [6]. Dreniranje karstne izdani najvećim delom se vrši putem izvora koji se prostiru duž istočnog oboda karstnog masiva u dolini Beljevine i Zlotske reke.

Samo izvorište se sastoji od 5 kaptiranih vrela koja dreniraju karstni masiv (Gaura Mare, Gaura Mika, Rnić, Mejlanović i Zlotska kaptaza), nekaptiranog Zlotskog vrela ispod Lazareve pećine i 5 bušenih bunara (od kojih je samo B-4 u eksploataciji). Kapacitet izvorišta na mesečnom nivou se kreće od 176,5 do 3300 l/s [6].

3. PRIMENJENE METODE

Analizom metoda ranjivosti koje se koriste u zaštiti karstnih izdanskih voda, neophodno je izabrati onu metodu koja je najbolje prilagođena konkretnim uslovima na terenu. Značajnu karakteristiku slivnog područja predstavlja veliko rasprostranjenje slabovodopropusnih formacija na kojima su razvijeni površinski tokovi koji dospevanjem na karstnu podlogu poniru preko većeg broja ponora i ponorskih zona. Na osnovu opisa i koncepcije uobičajenih metoda za ocenu ranjivosti, COP i PI metode predstavljaju najbolje prilagođene metode razmatranim hidrogeološkim uslovima. Ove metode se baziraju na analizi zaštitne funkcije nadizdanske zone u odnosu na difuznu infiltraciju, pri čemu se u obzir uzima i mogućnost zaobilaženja zaštitne funkcije, punktualnom infiltracijom preko ponora [24].

PI metoda

PI metoda kao modifikacija nemačke GLA metode, uzima u obzir i infiltraciju u karstnim područjima [5]. Karakteristična je po tome što ju je moguće primeniti u terenima koje ne karakteriše isključivo karstni tip

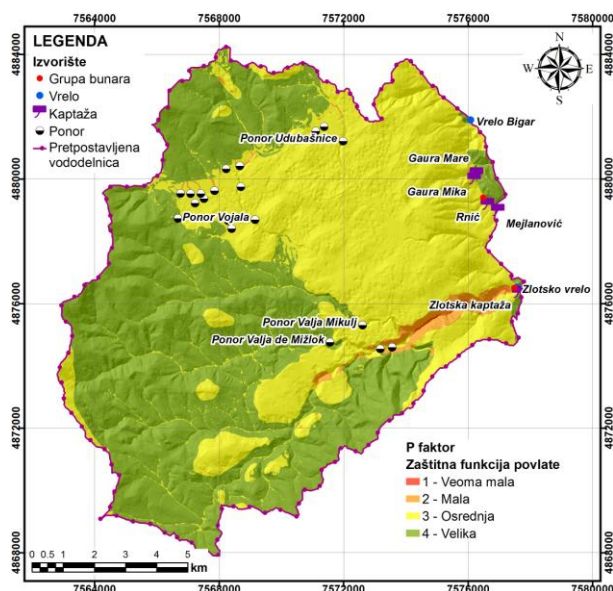
izdani, već su u okviru slivnog područja zastupljeni i drugi tipovi izdani ili slabovodopropusne stene.

Faktori na kojima se bazira PI metoda su [5]:

- P – Zaštitna funkcija nadizdanske zone (*en. Protective cover*);
- I – Stepen zaobilaženja zaštitne uloge nadizdanske zone (*en. Infiltration conditions*).

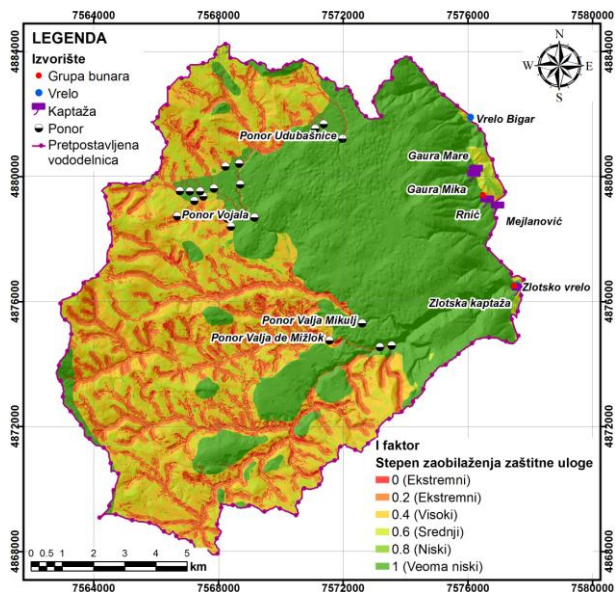
$$PI \text{ indeks ranjivosti} = P \cdot I$$

P faktor označava prirodnu zaštitu nadizdanske zone, predstavljene zemljištem i stenama koje se nalaze iznad nivoa podzemnih voda. Podloge koje su integrisane ovim faktorom su debljina i tekstura zemljišta, tip stena i njihova ispugalost, dubina do nivoa podzemnih voda, hidrodinamički karakter podzemnog toka i veličina i prostorna distribucija prihranjivanja podzemnih voda.

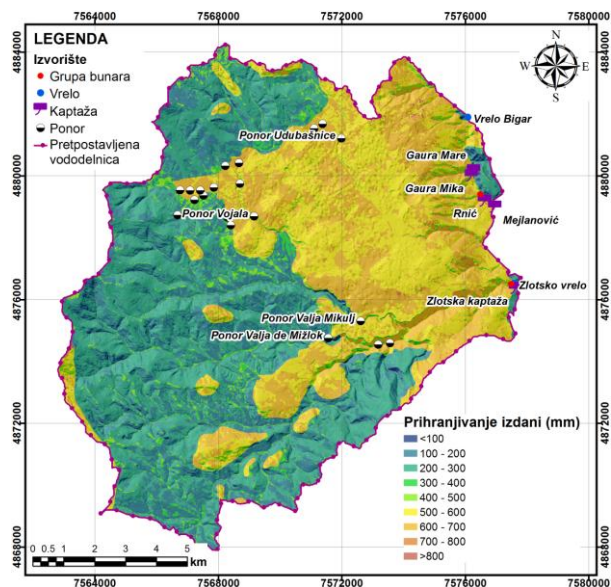


Slika 2. P faktor

I faktor se odnosi na mogućnost da zagađujuća supstanca zaobide zaštitnu ulogu stena i zemljišta u povlati, i dospe do nivoa izdani. Prilikom kreiranja ovog faktora, najpre se kreira karta I' na bazi informacija o dominantnom površinskom toku, tipu vegetacionog pokrivača, nagibu terena i dr. Nakon ovoga se karta I' koriguje sa kartom površine sliva, i kreira finalni I faktor. Delovi terena koji pripadaju zonama ponirućih tokova i ponorima, upravo predstavljaju zone u kojima dolazi do maksimalnog zaobilaženja zaštitnog efekta stena i tla.



Slika 3. I faktor



Slika 4. Prihranjivanje podzemnih voda (mm)

PI metoda ne uzima u obzir padavine kao zaseban faktor, što na prvi pogled može ukazati da odstupa od generalnog principa COST 620. Međutim, ova metoda u obzir uzima veličinu i prostorni raspored prihranjivanja podzemnih voda, što je znatno preciznije od pukog preuzimanja informacija o ukupnoj količini padavina sa reprezentativnih klimatoloških stanica. Za potrebe ovog rada, prihranjivanje podzemnih voda je određeno ulaznom komponentom (*en. Input*) TIME-INPUT metode [7] [26]. U ovom procesu korišćeni su podaci o veličini padavina, potencijalnoj i realnoj evapotranspiraciji, kao i koeficijentu površinskog oticaja.

$$\text{Prihranjivanje (mm)} = \text{Padavine (mm)} - \text{Evapotranspiracija (mm)} - \text{Površinski oticaj (mm)}$$

COP metoda

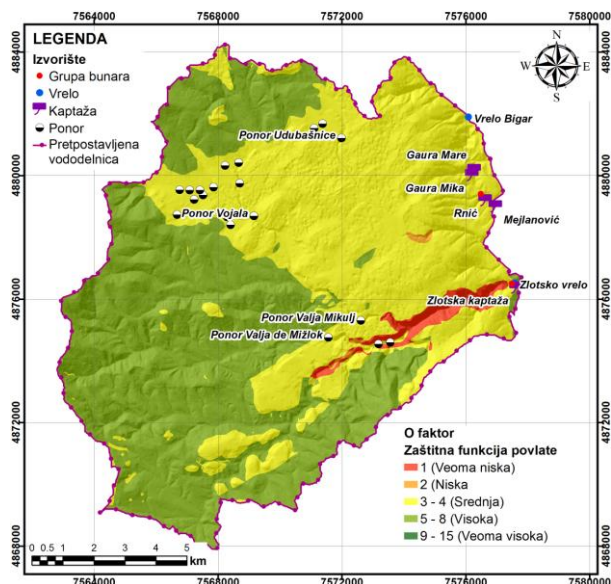
COP metoda je razvijena na hidrogeološkom odelu Univerziteta u Malagi [18]. Danas predstavlja veoma detaljnu i sveobuhvatnu metodu za ocenu ranjivosti karstnih izdanskih voda, i može se koristiti za različite klimatske uslove i različite karbonatne stene. Ova metoda je kreirana u skladu sa preporukama za određivanje ranjivosti karstnih izdanskih voda, odnosno u skladu sa „Evropskim pristupom“ (COST 620) [23].

Faktori na kojima se bazira COP metoda, koji su i predloženi Evropskim pristupom su [18]:

- C – Koncentracija toka (*en. Concentration of flow*);
- O – Povlatni slojevi (*en. Overlying layers*);
- P – Padavine (*en. Precipitation*).

$$\text{COP indeks ranjivosti} = C \cdot O \cdot P$$

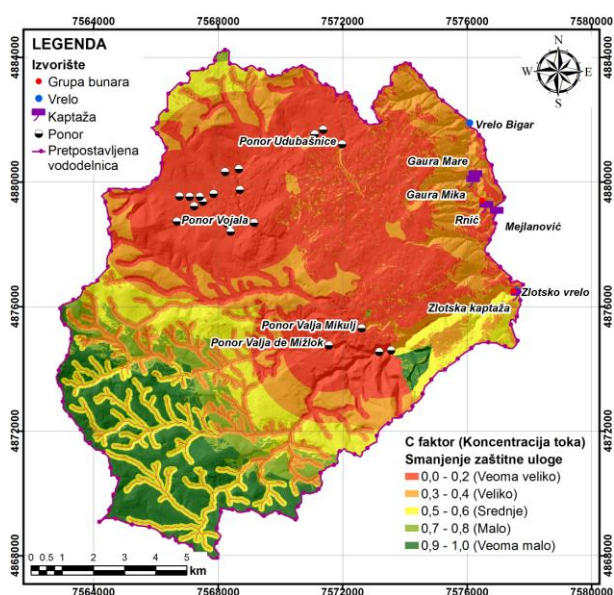
O faktor govori o zaštitnoj ulozi stena i pedološkog sloja u nadzidanskoj zoni. Formira se sabiranjem zaštitne uloge zemljišta i zaštitne uloge stena na području istraživanja. Prilikom definisanja uloge zemljišta posmatra se granulometrijski sastav i debljina, dok se uloga stenske mase određuje tipom, ispucalošću i hidrogeološkom funkcijom. Debljina stena se definiše na osnovu podloge o dubini do nivoa podzemnih voda, koja se formira u ranijim fazama istraživanja.



Slika 5. O faktor

Karstifikovane stene sa tankim ili bez zemljišnog pokrivača, i malom dubinom do nivoa izdani predstavljaju delove terena sa veoma niskom zaštitnom ulogom u odnosu na infiltraciju zagađujuće supstance.

C faktor je analogan I faktoru kod PI metode, i odnosi se na stepen zaobilazanja zaštitne uloge nadizdanske zone, difuznom infiltracijom preko vrtača ili koncentrisanom (punktualnom) infiltracijom preko ponora.



Slika 6. C faktor

Kod C faktora posebno se razmatra slivno područje ponora i ostatak slivnog područja. Kod slivnog područja ponora zaštitna uloga umnogome zavisi od rastojanja od ponora i površinskog toka, kao i nagiba terena i vegetacije. Sa druge strane, kod ostatka slivnog područja, odlučujuću ulogu u infiltraciji ima stepen razvijenosti površinskih karstnih oblika (vrtače, uvale i dr.), kao i prethodno pomenuti nagib terena i vegetacija. Delovi terena predstavljeni poljem vrtača i koncentrične zone oko ponora karakterišu se veoma velikim smanjenjem zaštitne uloge povlate.

P faktor opisuje ulogu padavina na proces ranjivosti, i izražava se preko intenziteta i sume godišnjih padavina. Ovaj faktor može imati dvojnu ulogu. Ranija istraživanja [3] [5] koja su tretirala uticaj padavina na promenu ranjivosti podzemnih voda, konstatovala su da vrednost do 1200 mm/god. povećava osetljivost izdani na zagađivanje, kao posledica brže infiltracije vode i zagađujuće supstance kroz nadizdansku zonu. Ukoliko

godišnja količina padavina prelazi 1200 mm, procesi razblaživanja zagađujuće supstance postaju značajni, tako da se i sama vrednost ranjivosti smanjuje. Na slivnom području, u odnosu na reprezentativnu klimatološku stanicu Crni vrh, prosečna godišnja suma padavina za desetogodišnji period iznosila je 860 mm, tako da je prevashodno razmatran negativni uticaj padavina na ranjivost podzemnih voda.

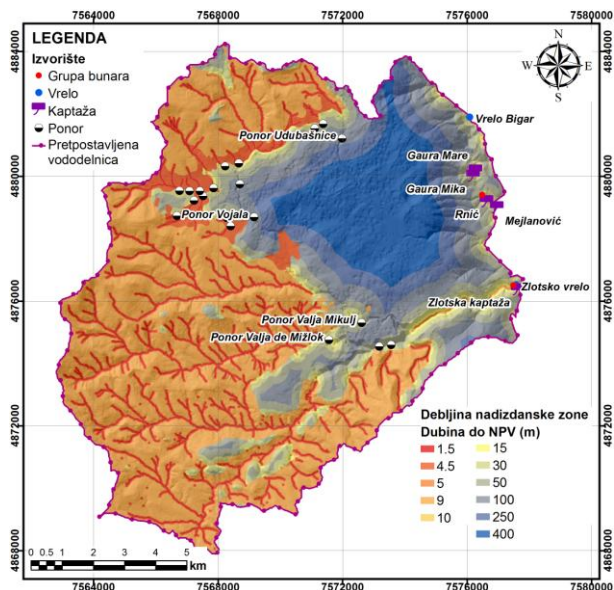


Slika 7. P faktor

Kao jedna od veoma važnih podloga, koja ulazi u proces kreiranja faktora i PI i COP metode je debljina nadizdanske zone (slika 8). Značaj ovog parametra ogleđa se u usporavanju ili konačnom iščezavanju zagađujućih supstanci koje se kreću sa površine terena, vertikalno kroz nadizdansku zonu, do nivoa podzemnih voda.

Zbog nepostojanja guste mreže istražnih objekata, karta dubina do nivoa podzemnih voda je određena uzimanjem u obzir tačaka sa poznatim dubinama do nivoa (izvori, reke i potoci), konstrukcijom topografskih i hidrogeoloških profila, kao i interpolacijama u zonama bez nabrojanih pojava.

Nakon primene metoda za ocenu ranjivosti podzemnih voda i generisanja prostornog rasporeda klasa ranjivosti, pristupa se delinaciji zona sanitarne zaštite.



Slika 8. Dubina do nivoa podzemnih voda

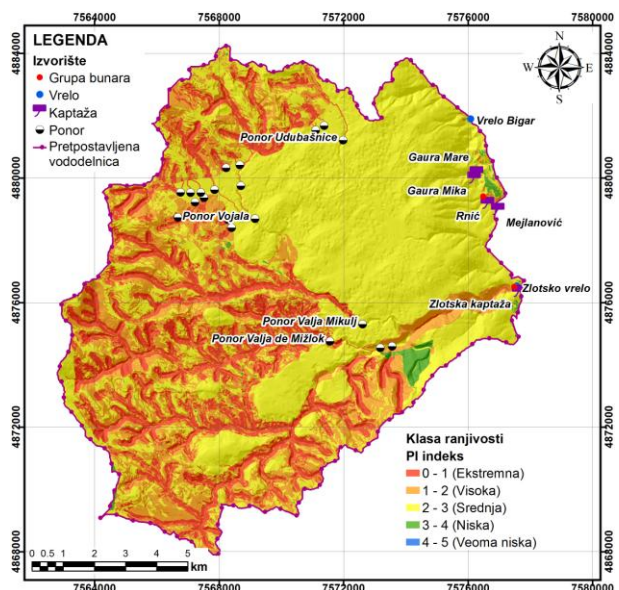
4. REZULTATI I DISKUSIJA

Primenom COP i PI metoda za ocenu ranjivosti, nakon proučavanja topografskih, geoloških, hidrogeoloških, pedoloških, geomorfoloških, hidroloških, vegetacionih i drugih karakteristika istražnog terena, definisane su klase ranjivosti podzemnih voda.

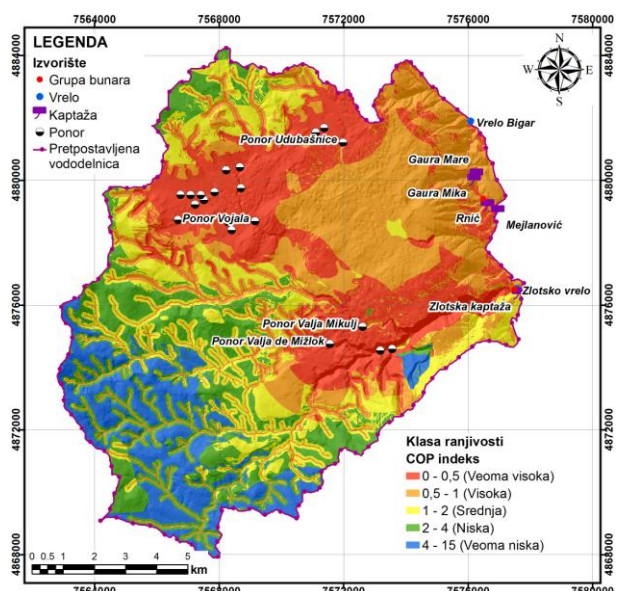
Na osnovu karte ranjivosti izrađene na osnovu PI metode (slika 9) može se jasno videti značaj nekarstnih terena u zaleđu, koji se najvećim delom karakterišu ekstremnom i visokom ranjivošću. Razlog ovome leži u činjenici da se na ovim terenima formira veliki broj ponirućih tokova, koji se punktualno infiltriraju preko ponora dospevanjem na karstnu podlogu. Pored ponirućih tokova, veoma visoka ranjivost karakteriše ponore i zone bliske ponirućim tokovima (gde je nivo izdani veoma blizu površine terena). Karstni teren se prevashodno odlikuje srednjim stepenom ranjivosti, pre svega zbog velike dubine do nivoa podzemnih voda. U zoni Lazarevog kanjona uočava se postojanje ekstremne i visoke ranjivosti, upravo zbog male dubine do nivoa izdani i postojanja izrazito poroznog zemljišta, kao posledice karstifikacije (kamenjar).

Sa karte ranjivosti COP metode (slika 10) uočava se prisustvo svih 5 klasa ranjivosti. Veoma visoka ranjivost (crveno) karakteriše karstne delove terena, tamo gde je nivo izdani relativno blizu površine, u neposrednoj zoni oko ponora i celom dužinom svih ponirućih tokova.

Visoka ranjivost (narandžasto) pre svega karakteriše delove sliva koji pripadaju karstu, a nisu obuhvaćeni veoma visokom ranjivošću (Dubašničko polje). Prelaskom na nekarstni teren, odnosno slivove ponirućih tokova, gradaciono se smenjuju srednja, niska i veoma niska klasa ranjivosti. Najudaljeniji delovi terena od Zlatskog izvorišta karakterišu se veoma niskom ranjivošću.



Slika 9. PI indeks ranjivosti



Slika 10. COP indeks ranjivosti

Nedovoljna adekvatnost primene COP metode na razmatranom području istraživanja ogleđa se u preuveličanom vrednovanju karstifikovanih područja (zone rasprostranjenja vrtača), odnosno njihovoj ulozi u infiltriranju atmosferskih taloga, s obzirom da procenjena dubina do nivoa izdani u tim delovima terena iznosi i do 400 m. Takođe, veliki deo ove površine je usled primene širokih koncentričnih zona oko ponora pripojen veoma visokoj klasi ranjivosti, iako se ne nalazi u slivu ponora i ponirućih tokova.

Primena PI metode u okviru slivnog područja Zlotoškog izvorišta naglašava opasnost od zagađivanja u nekarstnim (paleozojskim) delovima terena, na kojima se generišu stalni i povremeni površinski tokovi (slika 9). Kao obrazloženje navodi se da će se zagađujuća supstanca koja spiranjem usled padavina ili direktnim izlivanjem dospeva u neki od površinskih tokova, veoma brzo, u roku od samo nekoliko časova infiltrirati na ponoru. Nakon toga, usled veoma razvijene mreže karstnih kanala, visokih brzina filtracije podzemnog toka, zagađujuća supstanca može za manje od 24 časa dospeti do vodozahvatnih objekata [6]. Usled velike dubine do nivoa podzemnih voda na karstifikovanoj površini Dubašničkog polja, koja se kreće i do 400 m, ovi delovi sliva su predstavljeni srednjim stepenom ranjivosti.

Primenjene metode PI i COP za ocenu ranjivosti podzemnih voda pružaju različita rešenja. Nakon uporedne analize, može se konstatovati da je primena PI metode adekvatnija za razmatrano slivno područje, pa time i daje verodostojnije rezultate pri delineaciji zona sanitarne zaštite.

Nakon izrade karata ranjivosti podzemnih voda, njihove analize, interpretacije i izbora PI karte ranjivosti kao adekvatnije, pristupilo se delineaciji zona sanitarne zaštite:

PI metoda

- I zona (zona neposredne zaštite) – ponori, vrela (kaptaže) i bunari
- II zona (uža zona zaštite) – ekstremna i visoka klasa ranjivosti
- III zona (šira zona zaštite) – srednja, niska i veoma niska klasa ranjivosti

Ovakav način delineacije zona sanitarne zaštite već je primenjivan kod pojedinih metoda za ocenu ranjivosti. Jedan od primera je i primena EPIK metode u

određivanju zona sanitarne zaštite karstnih izvorišta u Švajcarskoj [4].

Na slici 11 prikazane su zone sanitarne zaštite dobijene nakon analize karte ranjivosti PI metode (slika 11, levo) i njihova komparacija sa zonama sanitarne zaštite koje su definisane 2014. godine u sklopu Elaborata o zonama sanitarne zaštite (slika 11, desno) [6]. U okviru ovog Elaborata prikazano je rasprostranjenje zona sanitarne zaštite poštovanjem aktuelne zakonske regulative, odnosno Pravilnika o načinu određivanja i održavanja zona sanitarne zaštite izvorišta vodosnabdevanja (Službeni Glasnik RS, broj 92/08).

Prema ovom pravilniku I zona sanitarne zaštite definisana je rastojanjem od 10 m oko vodozahvatnih objekata i ponora. II zona sanitarne zaštite obuhvata rastojanje sa kojeg voda dospeva do vodozahvatnih objekata za 24 časa, dok III zona obuhvata ostatak slivnog područja. U okviru slivnog područja predmetnog izvorišta, s obzirom da se radi o karstnom izvorištu, kao jedini kriterijum za definisanje II zone zaštite korišćeni su rezultati trasiranja ponora.

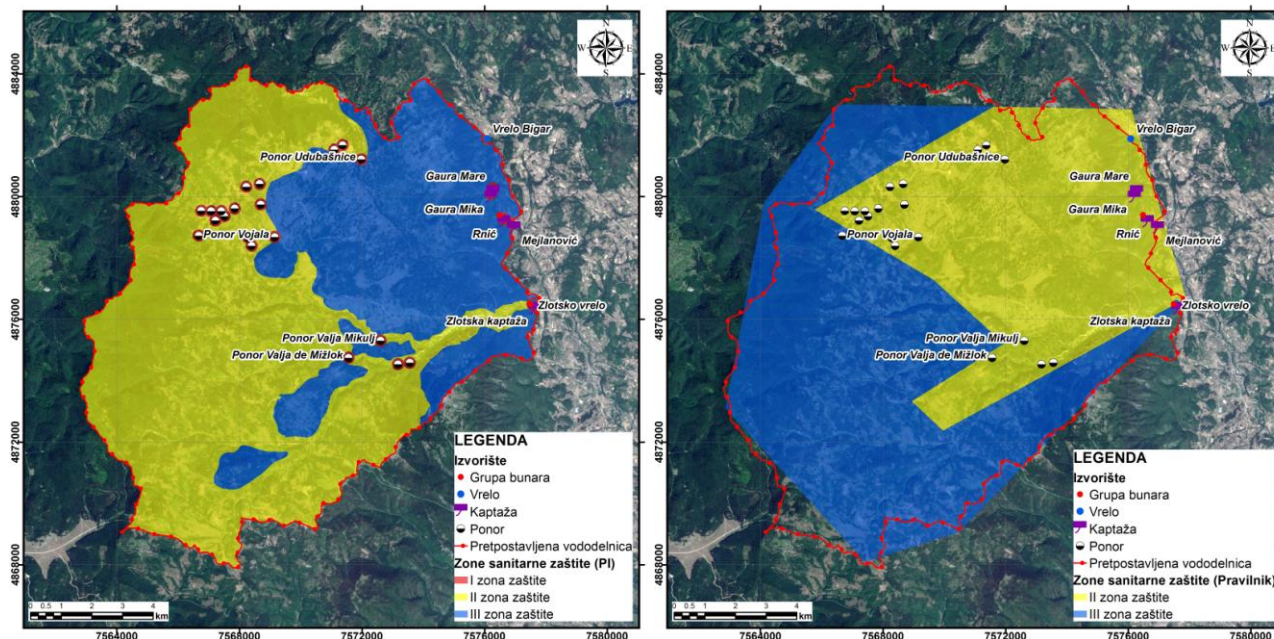
Crvenom bojom predstavljena je I zona zaštite, žutom bojom predstavljena je II zona zaštite, dok je plavom bojom predstavljen ostatak slivnog područja, odnosno III zona zaštite.

Uporednom analizom dobijenih rezultata u pogledu rasprostranjenja zona sanitarne zaštite, uočavaju se odstupanja zona definisanih Pravilnikom od onih dobijenih primenom PI metode. Specifičnost na analiziranom primeru predstavlja činjenica da se II zona sanitarne zaštite nalazi iza III zone, odnosno predstavlja najudaljeniju zonu u odnosu na Zlotoško izvorište (slika 11, levo).

5. ZAKLJUČAK

Na razmatranom primeru izvorišta Zlot, prikazano je da karte ranjivosti podzemnih voda predstavljaju neophodan alat kada je u pitanju uspostavljanje zona sanitarne zaštite izvorišta u karstu.

Izbor metode za ocenu ranjivosti izdanih voda predstavlja ključni korak u kasnijoj interpretaciji zona. Upravo od ovog koraka zavisi i uspešnost samog procesa, imajući u vidu da su sve metode razvijane za terene sa specifičnim geološko-hidrogeološkim uslovima.



Slika 11. Uporedni prikaz novih i starih zona sanitarne zaštite Zlotskog izvorišta

U slivu Zlotskog izvorišta primenjene su COP i PI metode za ocenu ranjivosti podzemnih voda. Obe metode, iako bazirane na „Evropskom pristupu“ (COST 620), pokazuju međusobna odstupanja. Uporednom analizom konstatovano je da se ove različitosti u rezultatima metoda zasnivaju na svojstvenom karakterisanju uslova infiltracije površinskih voda, odnosno načinu zaobilazanja zaštitne uloge nadzidanske zone.

PI metoda, izdvojena kao adekvatnija konkretnim uslovima unutar slivnog područja Zlotskog izvorišta, ekstremnu i visoku ranjivost dodeljuje slivnom području ponora i ponirućih tokova. Na taj način II zona sanitarne zaštite predstavlja najudaljeniju zonu od samog izvorišta, što ujedno ukazuje na potrebu preispitivanja „tradicionalnog pristupa“ u definisanju zona sanitarne zaštite.

Ovom prilikom važno je ukazati na nedostatak u postojećoj zakonskoj regulativi koji se vezuje za činjenicu da se prilikom izrade Elaborata o zonama sanitarne zaštite izvorišta za vodosnabdevanje vrše obimna hidrogeološka istraživanja za potrebe izrade karata ranjivosti, koje se kasnije suštinski ne primenjuju, već se celokupne zone sanitarne zaštite određuju na osnovu metoda fiksnog radijusa i vremena putovanja podzemne vode do vodozahvatnih objekata.

Kako bi se unapredila dosadašnja zaštita podzemnih vodnih resursa, pratili svetski trendovi, izbegli negativni efekti po kvalitet pijaćih voda i zdravlje krajnjih korisnika, nameće se neizostavna primena metoda za ocenu ranjivosti podzemnih voda u okviru delinacije zona sanitarne zaštite i definisanja dozvoljenih aktivnosti unutar njih.

LITERATURA

- [1] Aller L., Bennet T., Lehr J., Petty R. & Hackett G.: DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings, U.S. EPA, Chicago, Illinois, 1985.
- [2] Antonijević I., Kalenić M., Đorđević M. Lončarević Č., Čičulić M. i Škuletić T.: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000 list L34-140 Bor, Savezni geološki zavod, Beograd, 1966.
- [3] Civita M. & De Mario M.: Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: The Italian „combined“ approach, Geofisica International, Vol. 43, No. 4, p. 513-532, 2004.
- [4] Doerfliger N. & Zwahlen F.: EPIK: A new method for outlining of protection areas in karstic environment, Karst Waters and Environmental Impacts, Gunay and Johnson (eds), Balkema, Rotterdam, 1997.

- [5] Goldscheider N., Klute M., Sturm S. & Hotzl, H.: The PI Method - A GIS-Based Approach to Mapping Groundwater Vulnerability with Special Consideration on Karst Aquifers, *Zeitschrift für angewandte Geologie.*, Vol. 46, No. 3, p. 157-166, Hannover, 2000.
- [6] Jemcov I. i Živanović V.: Elaborat o zonama sanitarne zaštite zlotskih izvorišta (Opština Bor), Elaborat, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 2014.
- [7] Kralik M. & Keimel T.: Time-input, an innovative groundwater-vulnerability assessment scheme: application to an alpine test site, *Environmental Geology*, Vol. 44, No. 6, p. 679-686, 2003.
- [8] Krešić N., Vujasinović S. i Matić I.: Remedijacija podzemnih voda i geosredine, Udžbenik, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 2006.
- [9] Milanović S. i Vasić Lj.: Hidrogeološka osnova zaštite podzemnih voda u karstu na primeru Beljanice, *Vodoprivreda*, Vol. 43, No. 252-254, p. 165-173, 2011.
- [10] Milanović S., Stevanović Z., Đurić D., Petrović T. i Milovanović M.: Regionalni pristup izradi karte ugroženosti podzemnih voda Srbije – nova metoda „Izdan“, 15 Kongres geologa Srbije, Zbornik radova, p. 585-590, Beograd, 2010.
- [11] Milić U.: Primena daljinske detekcije u oceni ranjivosti podzemnih voda, Master rad, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 2017.
- [12] Mlinarić M., Loborec J. & Biondić R.: Zaštita podzemnih voda – primjer procjene ranjivosti sliva izvora Gradole (Hrvatska) metodom SINTACS, *Inženjerstvo okoliša*, Vol. 3, No. 1, 2016.
- [13] Petrović R., Jemcov I. i Polomčić D.: Ocena zaštitne funkcije povlatnih slojeva izvorišta Jasik (Opština Batočina) primenom GLA metode, *Vodoprivreda*, Vol. 46, No. 267-272, p. 101-109, 2014.
- [14] Polomčić D., Stevanović Z., Bajić D., Hajdin B., Ristić Vakanjac V., Dokmanović P. i Milanović S.: Vodospabdevanje i održivo upravljanje podzemnim vodnim resursima u Srbiji, *Vodoprivreda*, Vol. 44, No. 258-260, p. 225-231, 2012.
- [15] Ravbar N. & Goldscheider N.: Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in Slovenia, *Acta Carstologica*, Vol. 36, No. 3, p. 397-411, 2007.
- [16] Rebrenović M.: Ocena ranjivosti karstne izdani u slivu vrela Blederijska na Miroču, Diplomski rad, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 2013.
- [17] Vlada Republike Srbije: Pravilnik o načinu određivanja i održavanja zona sanitarne zaštite izvorišta vodosnabdevanja, *Službeni glasnik RS*, br. 92/2008.
- [18] Vias, J.M., Andreo B., Perles M.J., Carrasco F., Vadillo I. & Jimenez, P.: Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method, *Hydrogeology Journal*, Vol. 14, No.6, p. 912-925, Malaga, 2006.
- [19] Vrba J. & Zoporozec A.: Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability, *International Contributions to Hydrogeology (IAH)*, Hannover, 1994.
- [20] Zavod za geološka i geofizička istraživanja: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000 list L34-140 Žagubica, Savezni geološki zavod, Beograd, 1961.
- [21] Zavod za geološka i geofizička istraživanja: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000 list K34-8 Boljevac, Savezni geološki zavod, Beograd, 1963.
- [22] Zavod za geološka i geofizička istraživanja: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000 list K34-9 Zaječar, Savezni geološki zavod, Beograd, 1966.
- [23] Zwahlen F. [ed]: Cost Action 620, Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karstic) Aquifers, Final report Cost Action 620, Brussel, Luxemburg, 2004.
- [24] Živanović V.: Ocena ranjivosti podzemnih voda od zagađenja na primerima karsta Srbije, Magistarski rad, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 2011.
- [25] Živanović V., Dragišić V. i Atanacković N.: Primena DRASTIC metode pri oceni ranjivosti podzemnih voda na primerima nacionalnih parkova i parkova prirode Srbije, *Vodoprivreda*, Vol. 44, No. 258-260, p. 277-284, 2012.
- [26] Živanović V.: Razvoj metodologije zaštite izvorišta podzemnih voda primenom karata ranjivosti, Doktorska disertacija, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 2016.
- [27] Živanović V., Dragišić V., Jemcov I., Magazinović S. i Radosavljević J.: Određivanje zona sanitarne zaštite izvorišta podzemnih voda na bazi ukupnog vremena kretanja vode, XV srpski hidrogeološki simpozijum sa međunarodnim učešćem, Kopaonik, 2016.

APPLICATION OF GROUNDWATER VULNERABILITY MAPS IN DEFINING THE SANITARY PROTECTION ZONES IN KARST – CASE STUDY OF ZLOT WATER SOURCE

by

Uroš MILIĆ, Vladimir ŽIVANOVIĆ, Igor JEMCOV
Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade

Summary

According to the current Serbian legislation, the Rulebook on the Determination and Maintenance of Sanitary Protection Zones of Water Supply Sources (Official Gazette of RS, No. 92/08) requires implementation of preventive protection of groundwater resources with defined protection measures. According to this rulebook, the sanitary protection zones, their shape and size, respectively, depend mainly on the direction and speed of the groundwater circulation. Vertical movement of water or contaminants through the vadose zone is not taken into account. The concept of the groundwater vulnerability is based on the assessment of the conditions of vertical movement of contaminants with groundwater and therefore assess the protective role of the vadose zone. Considering the complex characteristics of karst environment, a number of methods for vulnerability assessment have been developed for these terrains. In this paper, COP and PI methods were applied and then results were mutually

compared. These methods are derived from the "European Approach" (COST 620), which provides the guidelines for the development of methods for the vulnerability assessment of aquifers in karst terrains. The main parameters that are analysed in defining the groundwater vulnerability are: the protective role of the vadose zone, conditions of concentrated infiltration and precipitation (recharge). The aim of the paper is to consider the possibility of applying the methods for the vulnerability assessment in the protection of karst water sources, taking the example of the Zlot source used for the water supply of Bor in eastern Serbia. In accordance with the obtained results, the PI method was selected as representative and then used to correct the shape and size of the previously defined sanitary protection zones according to the actual rulebook.

Key words: karst, groundwater vulnerability, COP method, PI method, sanitary protection zones

Redigovano 9.11.2018.