

ZAŠTITA PODZEMNIH VODA – PRIMJER PROCJENE RANJIVOSTI SLIVA IZVORA GRADOLE (HRVATSKA) METODOM SINTACS

GROUNDWATER PROTECTION - AN EXAMPLE OF VULNERABILITY ASSESSMENT OF THE GRADOLE SPRING CATCHMENT AREA (CROATIA) USING SINTACS METHOD

Maja Mlinarić, Jelena Loborec^{1*}, Ranko Biondić¹

¹ Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Zavod za hidrotehniku, Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, Hrvatska

*E-mail adresa osobe za kontakt / e-mail of corresponding author: jloborec@gfv.hr

Sažetak: Zaštita izvorišta pitke vode u Hrvatskoj se provodi na način da se štite priljevna područja tih izvorišta različitim razinama zaštite i različitim ograničenjima ljudske aktivnosti u tim zonama ovisno o razini zaštite. Kriteriji određivanja zona, kao i sam postupak donošenja zaštite podzemnih voda na priljevnom području izvorišta pitke vode određeni su na nacionalnoj razini zakonskom legislativom. Pojedine zemlje osim klasičnih hidrogeoloških istraživanja u metodologiju određivanja zaštitnih zona uvode i procjene prirodne ranjivosti vodonosnika kao jednu od podloga za kvalitetnije donošenje zaštitnih zona, ali i kvalitetnije određivanje ograničenja ljudskog djelovanja koje se donose za pripadajuće zone. U Hrvatskoj, primjena kartiranja prirodne ranjivosti nije obvezna metoda istraživanja kod određivanja zona sanitarne zaštite, ali u svakom slučaju pruža dodatne podloge kojima se kvalitetnije može odrediti zaštita nekog slivnog područja.

U radu je prikazana primjena kartiranja prirodne ranjivosti metodom SINTACS kod procjene učinkovitosti zaštite podzemnih voda u slivu izvora Gradole. Izvor Gradole je najveći zahvaćeni krški izvor u Istri te je nezamjenjiv izvor pitke vode za stanovništvo tog područja. Iz tog razloga vrlo je važno njegovo priljevno područje štiti na odgovarajući način kako bi se rizik od onečišćenja podzemne vode na tom području sveo na najmanju moguću mjeru. Kartiranje prirodne ranjivosti ukazalo je na dva područja na koja treba usmjeriti detaljna hidrogeološka istraživanja. To su: područje oko ponora Čiže koje je ocijenjenom klasom ekstremne ranjivosti (budući da tamo nema nikakvog zaštitnog pokrova, a ima stalnu podzemnu vodnu vezu s izvorom Gradole) i dio oko ponora u Tinjanskoj dragi, gdje je zahvaljujući slabije propusnim naslagama zemlje crvenice ranjivost ocijenjena kao vrlo visoka. Glavnina sliva ocijenjena je kao vrlo visoko i visoko ranjiva jer je građen od dobro do srednje propusnih stijena. Jedino se sjeveroistočni dio sliva nalazi u niskoj i vrlo niskoj klasi ranjivosti jer ga izgrađuje nepropusni fliš. Dobiveni rezultati mogu poslužiti u svrhu preciznije definicije pojedinih zona zaštite izvorišta Gradole.

Ključne riječi: Gradole, krški vodonosnik, prirodna ranjivost, SINTACS, zone zaštite.

Abstract: Protection of drinking water sources in Croatia is carried out in a way to protect the catchment area of these sources on different levels of protection and different limitations of human activities in these zones based on the level of protection. Criteria zoning, as well as the procedure of making the protection of groundwater inflow to the area of drinking water sources, are defined at the national level statutory legislation. Some countries, besides the classic hydrogeological research, in the methodology for determining protection zones have included the intrinsic vulnerability of aquifers assessment as one of additional tools for better definition of protection zones, but also for better determination of the limits of human activity that are made for the corresponding zone. In Croatia the use of intrinsic vulnerability mapping is not compulsory research method for determining the sanitary protection zones, but it provides additional information that can better the protection of a catchment area.

The paper describes the application of SINTACS method for intrinsic vulnerability mapping when assessing the effectiveness of the groundwater protection in the catchment area of Gradole spring. Gradole spring is the biggest captured karst spring in Istria and is an indispensable source of drinking water for the population of that area. For this reason, it is very important to protect the catchment area adequately so that the risk of groundwater contamination is reduced to a minimum. Mapping of intrinsic vulnerability pointed out the two areas on which more detailed hydrogeological research should be focused. These are: the area around the Čiže ponor which is evaluated as extremely vulnerable (since there's no protective cover and a permanent groundwater connection with a source Gradole) and part around the ponor in Tinjanska draga, where, thanks to the layers of red soil with lower permeability, vulnerability is rated as very high. Most of the basin has been assessed in very high and high vulnerability class because it is composed of good to medium permeable rock. Only the north-eastern part of the basin is assess as low and very low vulnerable because it is composed of impermeable flysch layers. The results can advantageously be used for more precise definition of Gradole spring water protection zones.

Keywords: Gradole, karst aquifer, intrinsic vulnerability, SINTACS, protection zones

Received: 25.04.2016 / Accepted: 17.05.2016

Published online: 04.07.2016

Znanstveni rad / Scientific paper

1. UVOD

Metode procjene ranjivosti postaju uobičajeni alat za zaštitu podzemnih voda, posebno u krškim područjima. Zaštita izvorišta pitke vode u Hrvatskoj se uobičajeno provodi definiranjem različitih zona zaštite unutar kojih su propisane aktivne mjere zaštite, a koje se odnose na ograničenja ljudskih aktivnosti ovisno o razini zaštite. Kriteriji određivanja zona, kao i sam postupak donošenja zaštite podzemnih voda na priljevnom području izvorišta pitke vode određeni su na nacionalnoj razini zakonskom legislativom, u Hrvatskoj je to Pravilnik o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta (NN 66/2011, 47/2013). Neke europske države procjenu ranjivosti uvrstile su u svoju zakonsku regulativu kao jednu od obaveznih metoda istraživanja kod definiranja zona sanitarne zaštite izvorišta pitke vode (npr. Švicarska – metoda E-PIK, Velika Britanija – metoda GOD, Kanada – metoda AVI). Hrvatska za sada još nije među njima, ali i kod nas se sve češće ovakve metode koriste provode u sklopu kompleksnih hidrogeoloških istraživanja (Biondić R. 2005; Meaški 2011; Kapelj et al. 2012; Loborec 2013; Biondić R. et al. 2014, 2016).

Upravo zbog toga je cilj ovoga rada pokazati mogućnost primjene jedne od metoda procjene prirodne ranjivosti u analizi zaštite krškog izvorišta, za koje su definirane zone sanitarne zaštite, te u skladu s dobivenim rezultatima predložiti moguća poboljšanja vezana uz samu zaštitu izvorišta.

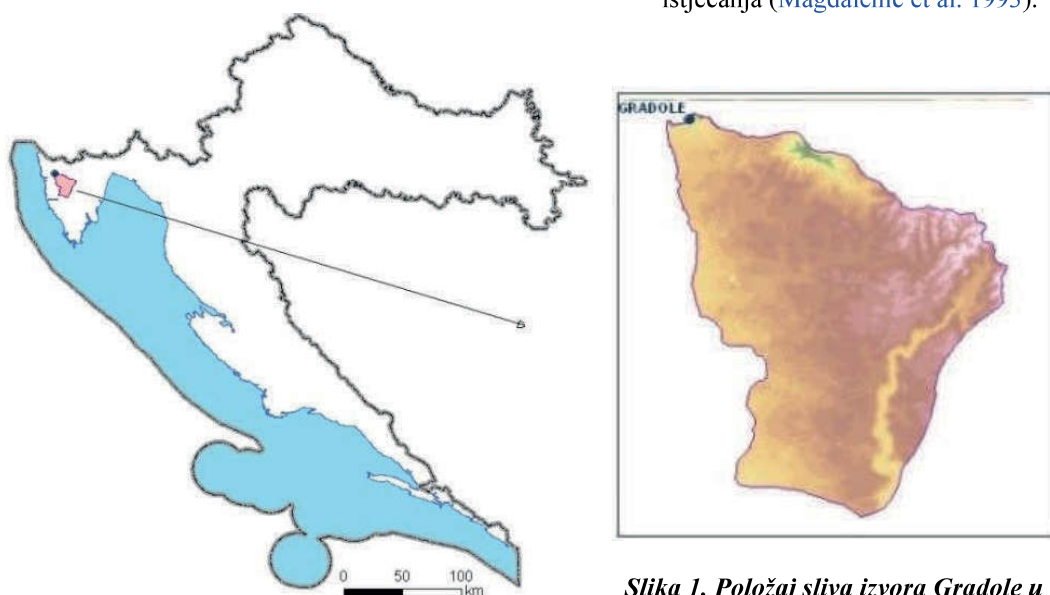
- Kao metoda procjena prirodne ranjivosti odabrana je SINTACS metoda (Civita & De Maio 1997, 2000), uz pomoć koje se proučavanjem prirodnih karakteristika svih dijelova vodonosne sredine (površinske naslage, nesaturirana zona i saturirani dio) nastoje izdvojiti oni dijelovi sliva koji su ranjiviji na negativne antropogene utjecaje. Danas u literaturi postoji mnogo primjera primjene SINTACS metode na različitim područjima (Janža & Prestor 2002; Corniello et al. 2004; Mali & Janža 2005; Civita et al. 2008; Kapelj et al. 2012; Biondić, R. et al. 2014).

- Za krški sliv je odabran sliv izvora Gradole koji je najveći zahvaćeni krški izvor u Istri. Vodocrpilište Gradole se nalazi u sjeverozapadnom dijelu istarskog poluotoka te za sada na njemu nisu zabilježene značajnije pojave antropogenog opterećenja. Da bi se stanje visoke kakvoće podzemne vode održalo nužno je provođenje kvalitetnog upravljanja. To uključuje striktno provođenje mjera zaštite u pojedinim zonama sanitarne zaštite, izgradnju sustava javne odvodnje u uzvodnom dijelu sliva i pročišćavanja otpadnih voda prije upuštanja u okoliš, kao i sanaciju onečišćivača prema zadanim prioritetima. Upravo zbog toga bi se ukazivanjem na ranjivije dijelove sliva stavio naglasak na područja kojima je potrebna jača zaštita, stroži nadzor i kvalitetno upravljanje. Dijelovi sliva koji bi se pokazali manje ranjivima mogli bi se namijeniti za aktivnosti koje imaju nešto veći stupanj opasnosti za narušavanje kakvoće podzemne vode.

2. ISTRAŽIVANO PODRUČJE

2.1. Geografski smještaj

Sliv izvora Gradole nalazi se na Istarskom poluotoku, najvećem hrvatskom i jadranskom poluotoku (Slika 1), kao dio šireg sliva rijeke Mirne. To je najduža i vodom najbogatija istarska rijeka, dužine 53 km, koja izvire u jugozapadnom dijelu Ćićarije, južno od Huma, a blizu Novigrada utječe u Jadransko more. Prema Planu upravljanja vodnim područjima Republike Hrvatske (NN 82/13) sliv izvora Gradole spada u Jadransko vodno područje, a nalazi se unutar cjeline podzemne vode Sjeverna Istra. Izvor Gradole je ključno i najveće vodocrpilište na Istarskom poluotoku. Kaptirano je za vodoopskrbu istarskih gradova, a dio vode se cjevovodima odvodi i u susjednu Republiku Sloveniju (Rižanski vodovod Koper). Ukupna srednja godišnja količina istjecanja je preko 2 m³/s, a godišnje se za potrebe vodoopskrbe koristi u prosjeku 0,55 m³/s, odnosno preko 17 milijuna m³ vode, što je oko 27 % ukupnih količina istjecanja (Magdalenić et al. 1993).



Slika 1. Položaj sliva izvora Gradole u Republici Hrvatskoj

Istraživano područje se nalazi u području sredozemne klime. U slivu nema niti jednog kišomjera, a najbliži su Višnjani, Motovun i Pazin koji se nalaze oko 2 km od vanjskih granica sliva izvora Gradole. Nalaze se na nadmorskim visinama od 244 do 291 m n.m. s prosječnim višegodišnjim količinama oborina od 988 mm (Višnjani), 1034 mm (Motovun) i 1168 mm (Pazin). Oborinski režim nije ni na ovom nevelikom porastu homogen, što predstavlja dodatni problem prilikom izrada hidroloških analiza. Pretpostavlja se da je srednja visina sliva izvora Gradole oko 340 m n. m. proizlazi da se srednja višegodišnja oborina kreće u rasponu od 1046 do 1120 mm. Slično je i s podacima o srednjoj godišnjoj transpiraciji. Jedini dostupni podaci su s mjernih postaja Pazin i Rovinj. Za potrebe ove analize podaci o oborinama i evapotranspiraciji korišteni su iz Klimatskog atlasa Hrvatske (Zaninović et al. 2008).

2.1. Hidrogeologija istraživanog područja

Izvor Gradole (Slika 2) je tipičan krški uzlazni izvor formiran u kontaktnoj zoni dobro vodopropusnih karbonatnih stijena kredne starosti i klastičnih naslaga kvartarne starosti u dolini rijeke Mirne. Voda izbija iz pukotine uz rub kvartarnih naslaga, a prelijevne vode izvora odvođene se kanalima prema rijeci Mirni. Uz izvor Gradole, u neposrednoj blizini, nalaze se još i izvori Male Gradole i Očjak. Za izvor Gradole su karakteristične oscilacije izdašnosti u rasponu od 0,3 do 18,3 m³/s. Relativno velika izdašnost izvora u sušnom razdoblju ukazuje na složene procese otjecanja podzemnih voda, odnosno na činjenicu da u istjecanju na izvoru Gradole sudjeluju znatno veće površine napajanja, odnosno da sudjeluju znatno širi regionalni tokovi (RGN 2003). Po svojoj izdašnosti u sušnom razdoblju to je ujedno i najveći izvor na istarskom poluotoku.



Slika 2. Izvor Gradole

Izvor drenira karbonatnu zaravan između rijeke Mirne i Limske drage. Za određivanje vanjskih granica sliva u obzir su uzeti podaci o geologiji, tektonici, morfologiji, fotogeološkoj interpretaciji terena, hidrogeološkim karakteristikama stijena, krškim morfološkim pojavama i podacima dobivenih trasiranjima podzemnih tokova (Magdalenić et al. 1993; Magdalenić et al. 1995; Biondić B. et al. 1999; Biondić R. et al. 2004). Istraživano područje je pretežno izgrađeno od naslaga kredne, paleogenske te

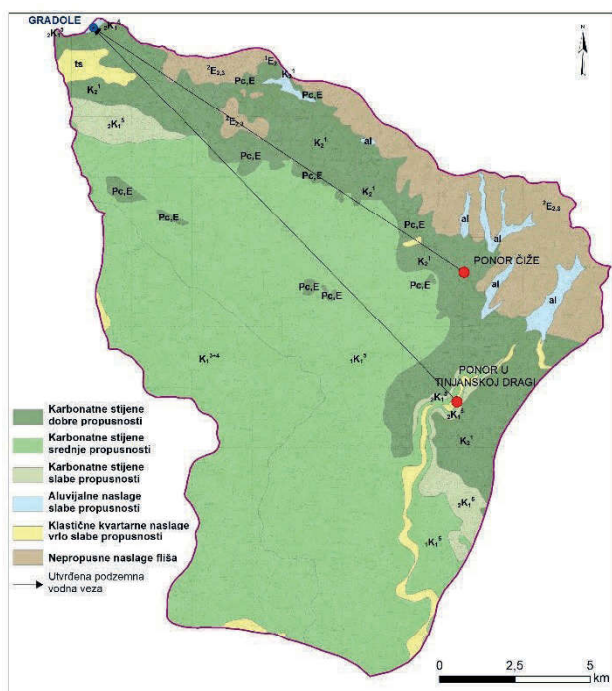
eocenske i kvartarne starosti. Karbonatne stijene, vapnenci i dolomiti, su pretežito kredne starosti dok su naslage paleogenske starosti pretežito klastične naslaga te manjim dijelom vapnenci. Za naslage eocenske starosti su karakteristične naslage fliša. Dio ovih naslaga lokalno je prekriven kvartarnim naslagama – potočnim ili riječnim nanosima (aluvij) i crvenicom. Promatrani geološki tipovi stijena imaju različite hidrogeološke značajke. S obzirom na propusnost, na području sliva moguće je izdvojiti pet osnovnih skupina stijena (Tablica 1).

Tablica 1. Hidrogeološke vrste stijena

Vodopropusnost	Osnovni opis stijene	Poroznost
Dobro propusne karbonatne stijene	Slojeviti do gromadasti vapnenci gornjokredne starosti te vapnenci paleogenske starosti	Pukotinska poroznost i okršenost
Srednje propusne karbonatne stijene	Brečasti vapnenci, pločasti do škriljavi vapnenci	Dominira pukotinska poroznost.
Slabo propusne stijene i naslage	Naslage donjokredne starosti u kojima se uz vapnence pojavljuju i dolomiti te vapnenci s proslojcima lapora; aluvijalne naslage kvartarne starosti.	Pukotinska poroznost kod karbonata i međuzrnska poroznost kod kvartarnih naslaga
Slabo propusne naslage	Klastične naslage zemlje crvenice kvartarne starosti.	Međuzrnska poroznost
Nepropusne naslage	Klastične fliške naslage (lapori i pješčenjaci).	Vrlo slabo izražena poroznost

Na istraživanom području postoji više jama dubokih preko 100 m, ali nijedna ne dopire do razine podzemne vode, što ukazuje na postojanje dubokog krškog vodonosnika (Magdalenić et al. 1993; Magdalenić et al. 1995). Usprkos velikom broju vrtača, jama i pukotina, mali je broj pojava u koji stalno dotječe voda na području sliva izvora Gradole. Najznačajnije rezultate dala su trasiranja ponora Čiže i ponora u Tinjanskoj dragi, gdje je utvrđena podzemna vodna veza s izvorom Gradole i na temelju kojih je utvrđen dominantni smjer toka podzemnih voda paralelan pružanju rasjednih struktura JI – SZ. Trasiranjima ponora Čiže, izvedenim uz različite

hidrološke uvjete dokazano je da je glavna drenažna zona kojom je usmjeren velik dio vode iz glavnog vodonosnika južne Istre u središnjem dijelu poluotoka od ponora Čiže do izvora Gradole. Glavni smjer kretanja podzemnih voda je JI–SZ, tj. prema rijeci Mirni, a podudara se s pružanjem struktura i smjerovima glavnih rasjednih sustava (Slika 3). Temeljem dokazanih podzemnih veza ponora Čiže i izvora Gradole u različitim hidrološkim uvjetima pojavila se je ideja umjetnog prihranjivanja izvora Gradole vodom iz susjednog sliva (akumulacija Butoniga) upojem u ponor Čiže (Magdalenić et al. 1993).



Slika 3. Shematska hidrogeološka karta područja sliva izvora Gradole

2.3. Postojeća zaštita izvorišta Gradole

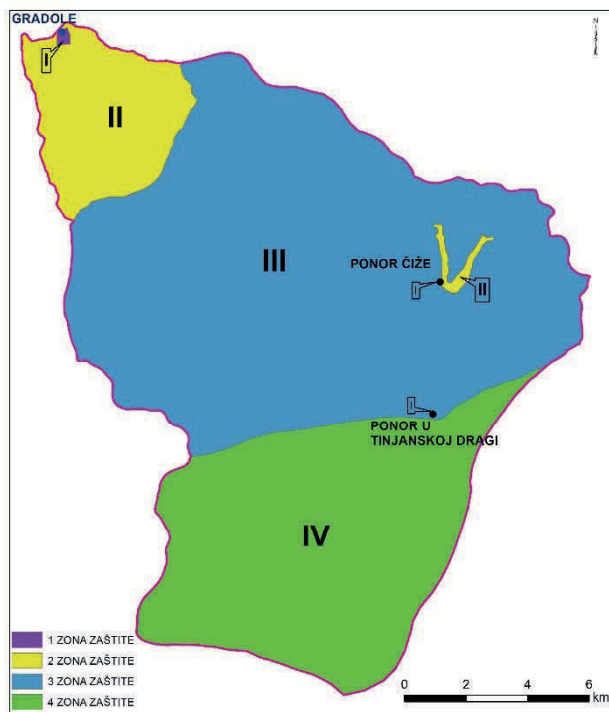
Tijekom 2003. godine provedena je analiza svih postojećih podataka, elaborata i studija, GIS-a Istre, te podataka iz aktivnog projekta za prekogranične vodonosnike hrvatsko-slovenskog graničnog područja i postojećih elaborata o zaštitnim zonama (RGN 2003). Cilj i namjena provedenih analiza je bilo usklađenje zaštitnih zona i mjera zaštite na cijelom prostoru Istarske županije, odnosno izrada novelirane podloge za donošenje jedinstvene Odluke o zonama sanitarne zaštite na području Istarskog poluotoka. Prijedlog zona sanitarne zaštite izvorišta vode za piće na području Istre, a time i za izvor Gradole je napravljen temeljem analize svih postojećih dostupnih podataka, ali bez dodatnih terenskih istraživanja (RGN 2003), u skladu s Pravilnikom o utvrđivanju zona sanitarne zaštite (NN 55/2002) koji je tada bio važeći.

Spomenuta analiza zaštitnih zona izvorišta Gradole napravljena je temeljem studije „Sliv izvora Gradole u Istri – Zone sanitarne zaštite“ (Magdalenić et al. 1993) koje je i bila osnovna stručna podloge, a u okviru koje je hidrološkim bilanciranjem i hidrogeološkom analizom dobivenih podataka procijenjena površina sliva od oko 104

km². Dobivena slivna površina je kasnijim analizama procijenjena kao mnogo veća, odnosno oko 170 km² površine hipotetičkog potencijalnoga sliva (Rubinić 1995) iz čega proizlazi da bi ukupna površina sliva koja u cjelini ili dijelom gravitira izvoru Gradole trebala biti značajnije veća od predložene u spomenutom elaboratu iz 1993. godine

Analizom podataka u sklopu studije iz 2003. godine (RGN 2003) slivna površina izvora Gradole, a time i površina zaštitnih zona izvora Gradole je znatno povećana te iznosi oko 235 km² jer se prema mišljenju autora (RGN 2003) u zaštiti ovog važnog izvorišta išlo na stranu sigurnosti, a što je s hidrološkog stanovišta puno prihvatljivije. Međutim, zaštitne zone izvorišta su ponovno zbog nedostatka trasiranja određene samo temeljem preliminarnih obrada količine napajanja izvorišta.

U skladu s provedenom analizom (RGN 2003) dat je i novi prijedlog zaštitnih zona (Slika 4). Prva zaštitna zona izvora Gradole ostala je nepromijenjena te i dalje obuhvaća samo izvorište i zaravan u zaleđu izvorišta na kojem su smješteni objekti za preradu vode. Objekti su izgrađeni na propusnim vapnencima te predstavljaju nepovoljnu stranu u zaštiti izvora. Druga zaštitna zona zauzima površinu od oko 23 km², a treća zaštitna zona površinu od oko 139 km². Unutar treće zaštitne zone nalazi se ponor Čiže, koji je predviđen kao objekt za umjetno napajanje podzemne vode i izvora Gradole. Ponorno područje je zaštićeno prema kriterijima za I. zonu, a doline koje gravitiraju ponoru su svrstane u II. zonu zaštite (površine oko 1 km²). Četvrta zaštitna zona zauzima površinu od oko 73 km².



Slika 4. Postojeće zaštitne zone izvora Gradole

3. PROCJENA PRIRODNE RANJIVOSTI SLIVA IZVORA GRADOLE SINTACS METODOM

Metoda procjene ranjivosti SINTACS razvijena je 90-ih godina u Italiji (Civita & De Maio 1997) po uzoru na američki DRASTIC (Aller et al. 1987). Autori ove metode željeli su predložiti model za procjenu ranjivosti koji bi bio primjenjiv na području cijele Italije, bez obzira na tip vodonosnika, kako bi rezultati bili usporedivi. Kroz godine se prvotno predložen sustav procjene nadopunjavao na temelju iskustava, primjenom metode na različitim područjima. Predlagane su novije, poboljšane verzije sve do 2000. godine kad je predložena verzija SINTACS R5 (Civita & De Maio 2000). Prema toj verziji, procjena ranjivosti se temelji na vrednovanju sedam parametara (Tablica 2) i na sustavu od pet težinskih koeficijenata. Parametri se konvertiraju pomoću predloženih dijagrama, tablica, raspona i izračuna u raspone vrijednosti od 1 do 10, gdje veća vrijednost parametra označava veću ranjivosti vodonosnika.

Tablica 2. Prikaz SINTACS parametara i njihovog značenja

S	Dubina do podzemne vode (S1)
I	Djelovanje efektivne infiltracije
N	Kapacitet razrjeđenja u nezasićenoj zoni
T	Kapacitet razrjeđenja u tlu/pokrovnim naslagama
A	Hidrogeološka obilježja vodonosnika
C	Raspon hidrauličke vodljivosti vodonosnika
S	Hidrološka uloga nagiba terena (S2)

Dobivene vrijednosti parametara se na kraju množe s težinskim koeficijentom koji ukazuje na odnos između parametara i njihove važnosti kod procjene ranjivosti, u zavisnosti o uvjetima na području vodonosnika. Postoji pet težinskih sustava za različite scenarije, kojima se definiraju težinski koeficijenti svakog pojedinog parametra, kako bi se procijenjeni parametri što bolje uklopili u hidrogeološke značajke vodonosnika i antropogeno opterećenje na površini promatranog područja (Tablica 3).

Tablica 3. Vrijednosti težinskih faktora u SINTACS metodi

Scenarij	Težinski koeficijent pojedinog parametra						
	S	I	N	T	A	C	S
Normalni uvjeti	5	4	5	4	3	3	2
Veliko opterećenje	5	5	4	5	3	2	2
Procjeđivanje	4	4	4	2	5	5	2
Krš	2	5	1	3	5	5	5
Raspucale stijene	3	3	3	4	4	5	4

Zbroj težinskih faktora u svakoj koloni iznosi 26. Svaka od kolona predstavlja drugačije uvjete (Civita & De Maio 2000). Konačan rezultat je vrijednost indeksa ranjivosti po SINTACS metodi koji se svrstava u intervale preko kojih se prikazuje relativan stupanj ranjivosti.

$$I_{V(SINTACS)} = I_{V(SINTACS)} = \sum_{i=1}^7 P_i \cdot W_i$$

gdje P_i predstavlja parametre SINTACS metode, a W_i težinske faktore.

Dobivene veće vrijednosti indeksa ranjivosti ukazuju na veću ranjivost, dok manje ukazuju na manju ranjivost vodonosnika (Tablica 4).

Tablica 4. Kategorije i rasponi ranjivosti dobiveni SINTACS metodom

Vrijednosti	Klasa ranjivosti	Boja na karti
> 210 - 260	Ekstremna	
> 186 - 210	Vrlo visoka	
> 140 - 186	Visoka	
> 105 - 140	Srednja	
> 80 - 105	Niska	
45 - 80	Vrlo niska	

Svaki od parametara SINTACS metode potrebnih za analizu prirodne ranjivosti sliva izvora Gradole zahtijevao je zasebnu pripremu ulaznih podataka koji su prikupljeni iz različitih izvora. Stoga je bilo vrlo važno prikupiti i proučiti rezultate do sada provedenih istraživanja na području sliva kako bi se što vjerodostojnije pripremili ulazni podaci. Neka istraživanja se do sada nisu provodila na području ovog sliva (mjerenja razina podzemne vode, nedostatak postavljenih meteoroloških postaja, detaljnija raspodjela pokrova tla, prostorna diferencijacija hidrauličke vodljivosti stijena, itd.) te je za određivanje parametara vezanih uz te podatke bilo potrebno napraviti procjene pri čemu su iskustvo istraživača i dobro poznavanje terena presudni. Kako su neki podaci interpolirani i procijenjeni, točnost SINTACS metode je u nekim segmentima grublja. Metodu uvelike poboljšavaju težinski faktori koji su određeni za svaki od sedam parametara u metodi SINTACS (Tablica 3). Preko težinskih faktora metoda je prilagođena krškom sustavu, stoga je i utjecaj pojedinih parametara na ukupan rezultat prilagođen krškim uvjetima.

Korištene su sljedeće podloge: topografske podloge Republike Hrvatske M 1:25 000 koje pokrivaju istraživano područje; Osnovna geološka karta listovi Rovinj (Polšak & Šikić 1969; Polšak & Šikić 1973) i Trst (Pleničar et al. 1969; Pleničar et al. 1973) M 1:100 000; Hidrogeološka karta sliva M 1:100 000 (Biondić B. et al. 1999); Hidropedološka karta Republike Hrvatske M 1:300 000 (Vidaček et al. 2004); Karta oborina Republike Hrvatske M 1:300 000 (Zaninović et al. 2008).

Topografske karte korištene su kao podloga za digitalizaciju slojnica, kota, vodnih objekata, te spilja, jama i ponora. Iz digitaliziranim slojnica izrađen je digitalni model reljefa (DEM – Digital Elevation Model) u „grid“ formatu, raster veličine ćelija 25x25 metara (Slika 4A). DEM je polazni format preko kojeg je prostornim modeliranjem

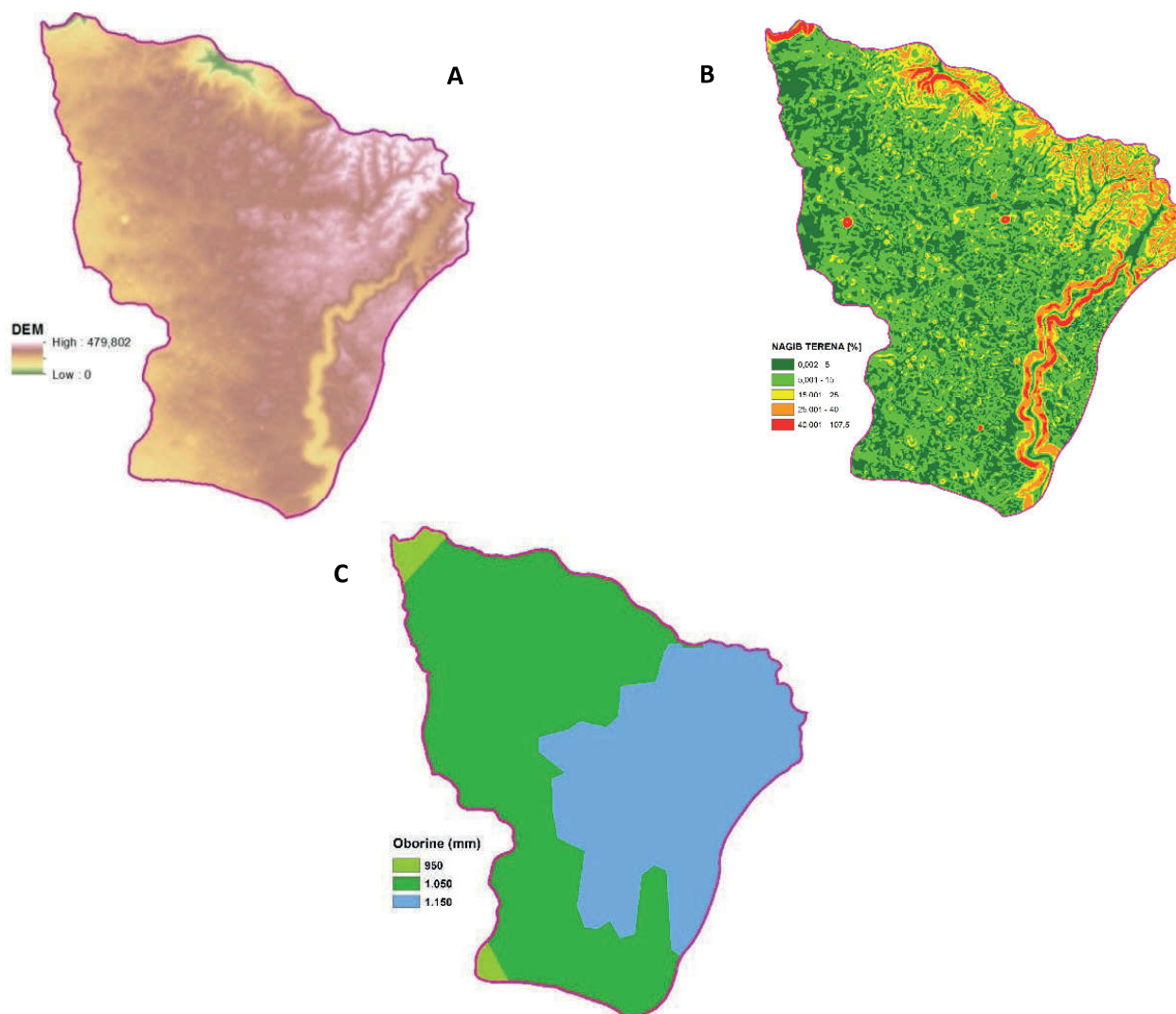
GIS alatima izrađena karta nagiba terena (Slika 4B), a poslužio je i kod definiranja dubina do podzemne vode (Mlinarić 2014).

Hidrogeološka karta osnovna je podloga kod procjene ranjivosti krškog vodonosnika jer definira konceptualni model dinamike vode u kršu. Također, podaci o osnovnim hidrogeološkim jedinicama na slivu korišteni su kod parametara koji definiraju svojstva vodonosnika.

Hidropedološka karta Republike Hrvatske, mjerila 1:300 000 (Vidaček et al. 2004) korištena je za definiranje osnovnih svojstava tla na istraživanom području potrebnih kod određivanja utjecaja tla na ranjivost vodonosnika, kao i kod određivanja utjecaja efektivne infiltracije. Iako zbog nazivnog mjerila nije primjerena za detaljne analize pojedinih slivova korištena je u ovom radu jer nisu bila dostupna detaljnija istraživanja tog tipa.

Iz Klimatskog atlasa Republike Hrvatske (Zaninović et al. 2008) korištena je karta oborina iz koje su digitalizirani podaci za područje sliva izvora Gradole. (Slika 4C). Raspon oborina u slivu izvora Gradole kreće se u rasponu od 950 mm do 1150 mm. Podaci o evapotranspiraciji su također korišteni iz Klimatskog atlasa Republike Hrvatske (Zaninović et al. 2008).

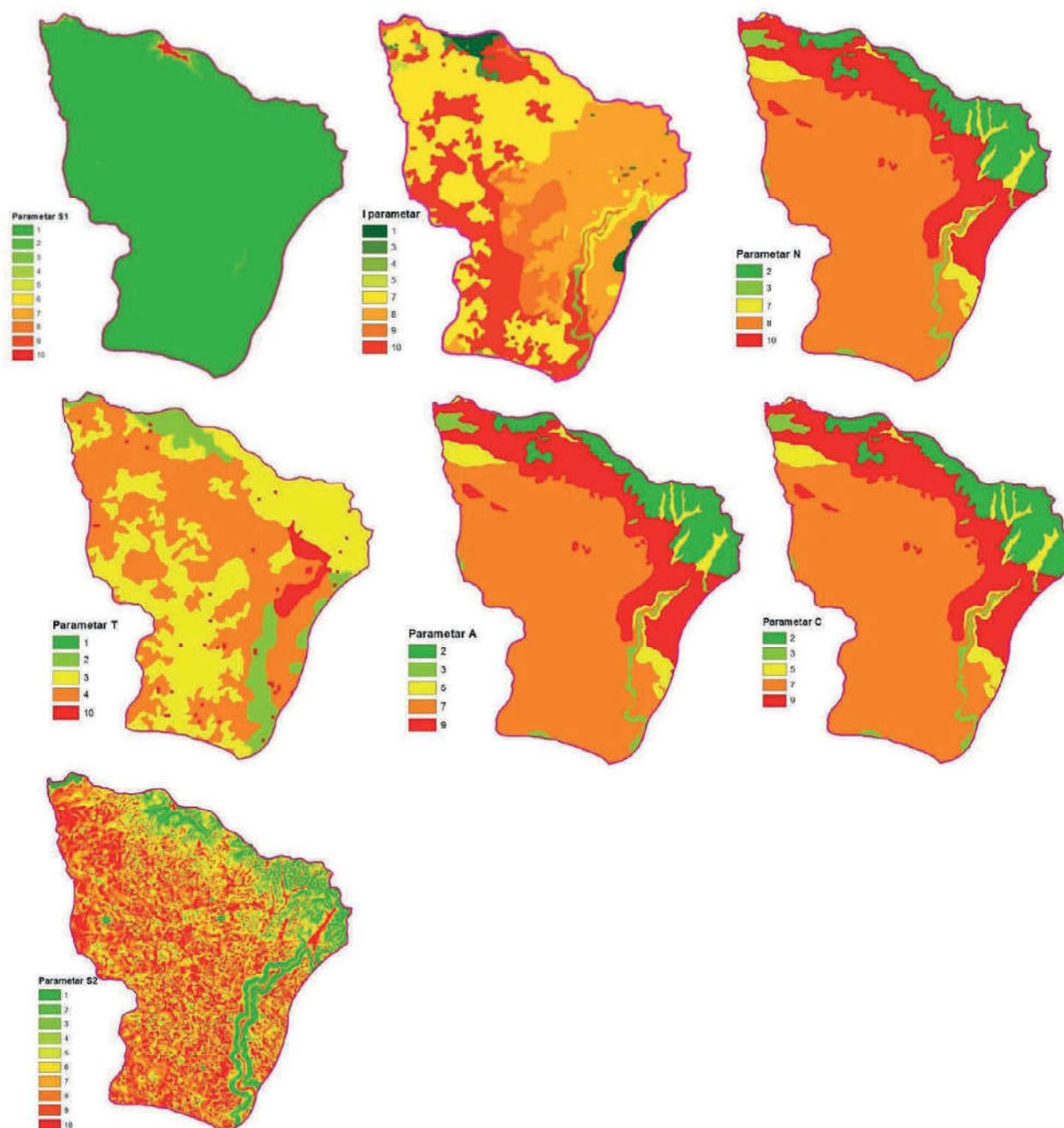
Procjene prirodne ranjivosti uobičajeno se provode uz pomoć GIS alata, prvenstveno alata vezanih za upravljanje podacima (*Data Management Tools*), zatim alata za vektorske analize (*Analysis Tools*) te alati za rasterske prostorne analize (*Spatial Analyst Tools*). Kombinacija spomenutih alata omogućuje upravljanje prostornim podacima i njihovim atributima, izrada kartografskih prikaza, ali i provođenje različitih prostornih analiza i modeliranja. Jedan od primjera provedene kompleksne prostorne GIS analize je određivanje parametra S_1 – dubine do podzemne vode. Kako podataka o mjerenim vrijednostima podzemne vode na području sliva nema, do vrijednosti parametra S_1 bilo je potrebno doći indirektnom metodom. Najprije je interpolacijskim metodama dobiven hidraulički gradijent između ponora Čiže i Tinjanska draga te izvora Gradole i izvora u Limskom kanalu. Pri tome je dio s nepropusnim fliškim naslagama predstavljen kao područje bez vode. Rasterskom analizom, upotrebom *Raster Calculatora* oduzete su vrijednosti kota terena iz digitalnog modela reljefa i apsolutnih kota razina podzemne vode te je dobiven raster dubina do podzemne vode čime je omogućena definicija vrijednosti parametra S_1 . Sažeti opis dobivanja vrijednosti ostalih parametara prikazan je u Tablici 5.



Slika 4: Neke od podloga koje su korištenu u analizi: DEM (A), karte nagiba terena (B), karta srednjih godišnjih oborina u slivu (C)

Tablica 5: Način dodjeljivanja vrijednosti pojedinih parametara u slivu izvora Gradole

S ₁	Opisano u tekstu		1 – 10
I		χ	1 – 10
	Slučaj 1: $I=(P-Et) \cdot X_{stijena}$		
	dobro propusni vapnenci	0.85	
	srednje propusni klastični vapnenci	0.7	
	slabo propusni dolomitni vapnenci	0.55	
	slabo propusni aluvij	0.3	
	slabije propusna crvenica	0.2	
	nepropusni fliš	0.12	
	Slučaj 2: $I=P \cdot X_{to}$		
	glina	0.02	
ilovača	0.15		
N	dobro propusni vapnenci		10
	srednje propusni klastični vapnenci		8
	slabo propusni dolomitni vapnenci i aluvij		7
	zemlja crvenica		3
	nepropusni fliš		2
T	gole stijene	0	10
	ilovača	>200 cm	3
	glina	>200 cm	1
	glina	90 cm	2
	ilovača (do 25cm)	80 cm	4
	ilovača	60 cm	5
	glina	50 cm	2
	glina	40 cm	3
A	dobro propusni vapnenci		8
	srednje propusni klastični vapnenci		7
	slabo propusni dolomitni vapnenci i aluvij		5
	slabije propusna crvenica		3
	nepropusni fliš		2
C	dobro propusni vapnenci		9
	srednje propusni klastični vapnenci		7
	slabo propusni dolomitni vapnenci i aluvij		5
	slabije propusna crvenica		3
	nepropusni fliš		2
S ₂	Nagib terena [%]		
	0 - 3		10
	3 - 5		9
	5 - 7		8
	7 - 10		7
	10 - 13		6
	13 - 17		5
	17 - 19		4
	19 - 23		3
	23 - 27		2
> 27		1	



Slika 5: Prostorni prikaz dobivenih SINTACS parametara na slivu izvora Gradole

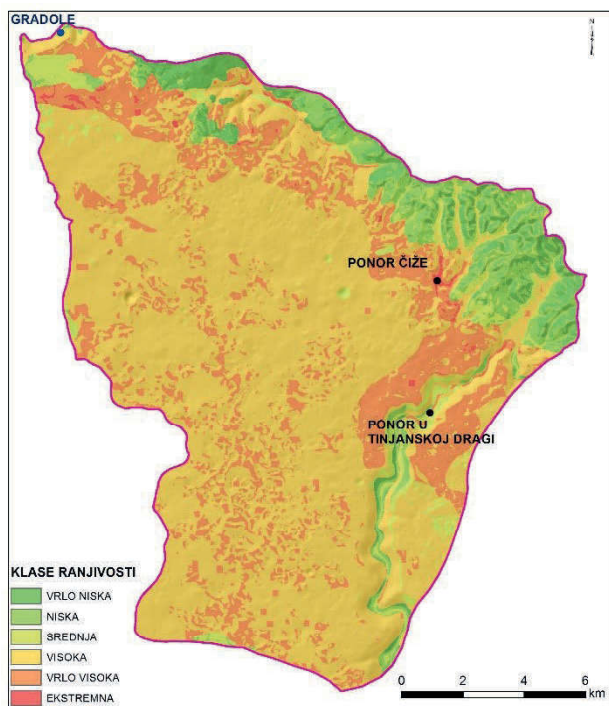
Dobiveni parametri SINTACS metode (Slika 5) su prema uputama metode pomnoženi s odgovarajućim težinskim faktorima. Kako se sliv izvora Gradole nalazi u krškom području, primijenjen je težinski faktori za krška područja: S1-2, I-5, N-1, T-3, A-5, C-5 i S2-5, te je formula za izračun indeksa ranjivosti (I_v – vulnerability index) prema formuli:

$$I_{v(SINTACS)} = (S1 \cdot 2) + (I \cdot 5) + (N \cdot 1) + (T \cdot 3) + (A \cdot 5) + (C \cdot 5) + (S2 \cdot 5)$$

Temeljem dobivenih rastera svakog pojedinog parametra SINTACS metode i njihovih težinskih faktora, raster-skom analizom dobiven je raster prostorne raspodjele vrijednosti indeksa ranjivosti sliva izvora Gradole. Indeks

ranjivosti klasificiran je prema propisanim rasponima, u šest klasa ranjivosti, a različiti stupanj ranjivosti prikazan je na karti ranjivosti (Slika 6) različitom bojom.

Prema dobivenoj karti SINTACS metodom (Slika 6) koja prikazuje ranjivost vodonosnika u slivu izvora Gradole, te prema odnosu površina sliva zahvaćenih pojedinom klasom ranjivosti, prikazani u Tablici 6 i na Slici 7, vidljivo je da se većina sliva nalazi u visokoj i vrlo visokoj razini ranjivosti, prvenstveno zbog hidrogeoloških karakteristika stijena koje ga izgrađuju, a to su dobro propusne karbonatne stijene. Sjeveroistočni dio sliva se nalazi u vrlo niskoj i niskoj razini ranjivosti zbog toga jer se u tom dijelu sliva nalazi nepropusni fliš, sa slojevima slabije propusne zemlje crvenice koja također ima izraženu sposobnost zadržavanja onečišćenja.



Slika 6: Karta prirodne ranjivosti sliva izvora Gradole prema SINTACS metodi i težinskim faktorima za krš

Tablica 6: Rezultati procjene prirodne ranjivosti

KLASA	RANJIVOST	POVRŠINA (km ²)
1	VRLO NISKA	10,7
2	NISKA	16,2
3	SREDNJA	12,1
4	VISOKA	146,5
5	VRLO VISOKA	50,0
6	EKSTREMNA	1,1



Slika 7: Rezultati procjene prirodne ranjivosti

SINTACS je metoda koja daje veliki raspon klasa ranjivosti. Zbog toga je omogućena kvalitetna usporedba ranjivosti u slivu. Općenito metoda djeluje na način da su ranjivija područja ona koja po svojim prirodnim karakteristikama imaju manju prirodnu zaštitu na površini,

u nezasićenoj zoni vodonosnika i dinamikom podzemne vode unutar samog vodonosnika. Upotrebom težinskih faktora koji su prilagođeni krškom okruženju, metoda naglašava utjecaj pojedinih parametara na konačni rezultat procjene ranjivosti. Tako u ovom slučaju daje na važnosti infiltraciji kod konačnog izračuna zbog toga što je jako važno da li voda prolaskom u podzemlje zaobilazi zaštitnu funkciju pokrovnih naslaga ili ju u pravoj mjeri uspijeva iskoristiti. Isto tako maksimalan težinski faktor dodan je i hidrauličkoj vodljivosti te interpretaciji hidrogeoloških značajka vodonosnika kao i nagibu terena, sve zbog važne uloge koju ovi parametri imaju na formiranje tokova u kršu (Mlinarić 2014).

4. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

Sliv izvora Gradole je dio sliva rijeke Mirne i najvažnije je vodocrpilište poluotoka Istre, pogotovo za vrijeme ljetnih sušnih razdoblja. Stoga je iznimno važno kvalitetno zaštititi sliv izvora Gradole na odgovarajući način, kako bi se i dalje mogle koristiti strateške rezerve vode iz izvora, bez nepotrebnog ograničavanja razvoja ovog područja. U radu je prikazana postojeća zaštita izvorišta Gradole, procjena ranjivosti krškog vodonosnika SINTACS metodom na području sliva izvora Gradole, te usporedba ovih dvaju pristupa u zaštiti krškog izvorišta. Usporedba postojećih zona zaštite i zona ranjivosti dobivenih SINTACS metodom uočeni su određeni nerazmjeri. To se prvenstveno odnosi na preciznije definiranje određenih problematičnih dijelova koji su se pojavili analizom ranjivosti unutar pojedine definirane zone zaštite, čime se dobiva finija raspodjela šticeđenih područja i sprječava nepotrebno ograničavanje aktivnosti. Sve to može se pomiriti korištenjem različitih pristupa u analizi zaštite izvorišta Gradole.

Naime, postojeći Pravilnik o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta (NN 66/2011, NN 47/2013), ali i stari Pravilnik o utvrđivanju zona sanitarne zaštite izvorišta (NN 55/2002) prema kojem je i napravljena zaštita izvorišta Gradole, propisuju provedbu vodoistražnih radova kao i izradu Elaborat zona sanitarne zaštite. Vodoistražni radovi su stručno najznačajniji stupanj, jer se određuju zaštitni prostori, dinamičko funkcioniranje krških vodonosnika, dimenzije sliva itd, a podrazumijevaju geološka, hidrogeološka, hidrološka, hidrogeokemijska i kemijska istraživanja. U slučaju da svi vodoistražni radovi nisu provedeni, ili nisu dostatni, potrebno je napraviti dodatna istraživanja.

Kod izvora Gradole zaštitne zone su određene temeljem hidrološke i hidrogeološke studije iz 1993. godine (Magdalenić et al. 1993) koje je bila osnovna stručna podloga te 2003. godine dodatnom analizom postojećih podataka (RGN 2003). Međutim, zaštitne zone izvorišta su ponovno određivane samo temeljem preliminarnih obrada količine napajanja izvorišta bez provedbe dodatnih trasiranja. U skladu s tim, moguće je da su pojedine zone zaštite predimenzionirane.

Što se same SINTACS metode tiče, ona u svojoj procjeni uključuje sedam parametara te se zbog toga naizgled čini dosta precizna, ali istovremeno i komplicirana. Kod pripreme podataka koji su potrebni za definiranje parametara SINTACS metode nailazi se na nekoliko poteškoća. Naime, metoda zahtijeva precizno određene veličine koji

ulaze u konačan izračun indeksa ranjivosti, a do takvih podataka je teško doći, posebice u kršu. Potrebna je dobra interpretacija i aproksimacija postojećih podataka te dobro poznavanje programa (ESRI ArcGIS u ovom slučaju) kako bi se na što bolji način odredili ulazni podaci potrebi kod izračuna parametara, kao što su: poznavanje dubine do podzemne vode, infiltracija, debljina pokrova, hidraulička vodljivost... Kako bi se svi ti podaci dobro definirali važno je dobro odrediti geološke i hidrogeološke značajke promatranog sliva. Ipak, i dobrim poznavanjem terena pretpostavke su grube jer krš sam po sebi je zahtjevan teren, heterogen i anizotropan, te je svaka interpolacija ujedno i aproksimacija. Metodu poboljšavaju težinski faktori kojima se na kraju množi svaki parametar. Težinski faktori maksimalno omogućavaju prilagodbu metode površinskim uvjetima u slivu.

Kao dobra provjera metode procjene prirodne ranjivosti i postojećeg sustava određivanja zaštitnih zona mogu poslužiti određene mikrolokacije u krškom slivu. U slučaju istraživanog područja treba istaknuti činjenicu da su osim samog izvora Gradole važni dijelovi sliva i dva ponora: Čiže i Tinjanska draga koji su prema postojećim zonama zaštite u visokoj I. odnosno II. zoni zaštite izvorišta Gradole. Prema odabranoj SINTACS metodi usko područje oko ponora Čiže kao i sam ponor Čiže su ocijenjeni kao ekstremno ranjivi. U prilog dobivenim vrijednostima ide i činjenica kako je utvrđena podzemna vodna veza tog ponora s izvorom Gradole. Međutim, za razliku od ponora Čiže, ponor Tinjanska draga i područje oko ponora Tinjanska draga je ocijenjeno s ranjivošću vrlo visokog stupnja. Naime, oko ponora Tinjanska draga nalazi se površinski pokrov zemlje crvenice koja je slabije propusna od okolnog područja, ali također, zbog svojih geokemijskih karakteristika ima izraženu sposobnost zadržavanja onečišćenja. Iz tog razloga ona pruža svojevrstu zaštitu samom ponoru, tako da prema SINTACS metodi ovo područje nema ekstremnu ranjivost. Sam izvor Gradole i područje oko izvora Gradole (**Slika 6**) ocijenjeno je prema SINTACS metodi kao srednje do visoko ranjivo. Razlog tome je što oko izvora postoji veliki broj rasjeda, pukotina, vrtača i jama koje karbonatne naslage čine u cijelosti propusnim stijenama. Općenito su na području čitavog sliva problematični dijelovi bez kontinuiranog pokrova tla, pogotovo u kombinaciji s dobro propusnim vapnencima.

Ukupno gledajući, pomoću SINTACS metode procijenjena je prirodna ranjivost u slivu izvora Gradole na zadovoljavajući način. Na slivu su izdvojena ranjivija područja upravo na mjestima gdje postoje stroge zone sanitarne zaštite: izvor Gradole, ponori Čiže i Tinjanska draga. Ostatak sliva ima različite stupnjeve ranjivosti, tj. dijelovi su više ili manje prirodno zaštićeni od utjecaja potencijalnog onečišćenja, što može pomoći kod preciznijeg definiranja zona sanitarne zaštite na temelju prirodnih obilježja vodonosnika u odnosu na trenutno važeće zone sanitarne zaštite izvora Gradole. U skladu s navedenim, moguće je da se SINTACS metodom dobiju za pojedine dijelove sliva krive procjene stvarnih uvjeta. Međutim, u svijetu postoje i mnoge druge metode procjene prirodne ranjivosti te bi se pažljivim odabirom i kalibracijom modela mogli postići mnogo bolji rezultati.

Važno je istaknuti da bilo koja metoda procjene ne može zamijeniti ni jedno drugo istraživanje. Koristi se kao

vrlo koristan, ali isključivo dodatni alat u kompleksnim hidrogeološkim istraživanjima. Time se povećava količina znanja o istraživanom području i omogućuje kvalitetnije upravljanje i učinkovitija zaštita krških vodonosnika.

5. LITERATURA

Aller, J.R., Bennet, T., Feheer, J.H., Petty R.J. & Hackett G. (1987): DRASTIC, a standardised system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings. US EPA 600/2-87-035

Biondić B., Kapelj S., Kuhta M., Biondić, R., Dukarić, F., Larva, O., Terzić, J. & Singer, D. (1999): Vodnogospodarska osnova Republike Hrvatske, GIS Istre, Hidrogeologija, Zagreb

Biondić, R., Kapelj, S., Rubinić, J., Marković, T., Singer, D., Horvat, B. & Kukuljan, I. (2004): Granični vodonosnici Hrvatske i Slovenije između Kvarnerskog i Tršćanskog zaljeva. Završni elaborat II. Faze istraživanja. Institut za geološka istraživanja, Zavod za hidrogeologiju i inženjersku geologiju Zagreb

Biondić, R. (2005): Zaštita voda gornjega dijela sliva Kupe. Doktorska disertacija. Sveučilište u Zagrebu. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 171 str., Zagreb.

Biondić, R., Meaški, H., Biondić, B. & Loborec, J. (2014): Vulnerability mapping of Novljanska Žrnovnica karst spring catchment area in Croatia. Final report. Arhiv Geotehničkog fakulteta

Biondić, R., Meaški, H., Biondić, B. & Loborec, J. (2016): Karst Aquifers Vulnerability Assessment (KAVA) method applied to the Bakar Bay catchment area in Croatia. Final report. Arhiv Geotehničkog fakulteta

Civita, M., & De Maio, M. (1997). SINTACS: Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia delle vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Metodologia e automatizzazione.

Civita M. & De Maio M. (2000): SINTACS R5, a new parametric system for the assessment and automating mapping of groundwater vulnerability to contamination – Pitagora Editor (Bologna), 226 str.

Civita M., Pezdič J. & Uhan J. (2008): Ocenjevanje ranjivosti podzemne vode z metodo SINTACS v Spodnji Savinjski dolini, Slovenija, Ljubljana

Corniello A., Ducci D. & Monti G.M. (2004): Aquifer pollution vulnerability in the Sorrento Peninsula, Southern Italy, evaluated by SINTACS method. Geofis. Int. 43/4, 575-581.

Janža M. & Prestor J. (2002.): Ocena naravne ranjivosti vodonosnika v zaledju izvira Rižane po metodi SINTACS, Geologija, Ljubljana, 45/2, 401-406.

Kapelj S., Loborec J. & Kapelj J. (2012): Assessment of aquifer intrinsic vulnerability by the SINTACS method, Geologia Croatica, Vol. 66, No. 2, 119-128, Zagreb.

Loborec J. (2013): Procjena rizika od onečišćenja podzemnih voda u kršu na području sliva izvora Jadra i Žrnovnice, Doktorska disertacija. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.

Magdalenic A., Bonacci O., Vazdar T. & Hlevnjak B. (1993): Sliv izvora Gradole u Istri, Zone sanitarne zaštite, Hidrogeološka i hidrološka studija, Hydroexpert, Zagreb.

Magdalenic, A., Vazdar, T., & Hlevnjak, B. (1995). Hydrogeology of the Gradole Spring Drainage Area in Central Istria. Geologia Croatica 48/1, 98-106, Zagreb.

Mali N. & Janža M. (2005): Ocena ranjivosti vodonosnika s SINTACS modelom v GIS okolju, Geologija, 48/1, Ljubljana, 127-140. Ljubljana.

Meaški, H. (2011): Model zaštite krških vodnih resursa na primjeru Nacionalnog parka „Plitvička jezera“. Doktorska disertacija. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 210 str., Zagreb.

Mlinarić M. (2014): Kartiranje prirodne ranjivosti krškog vodonosnika SINTACS metodom na primjeru sliva izvora Gradole. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Varaždin.

Plan upravljanja vodnim područjima Republike Hrvatske, Narodne novine 82/2013

Pleničar, M., Polšak, A. & Šikić, D. (1969): Osnovna geološka karta 1:100 000, list Trst. Savezni geološki zavod, Beograd

Pleničar, M., Polšak, A. & Šikić, D. (1973): Tumač za list Trst (OGK 1:100 000). Savezni geološki zavod, Beograd

Polšak, A. & Šikić, D. (1969): Osnovna geološka karta 1:100 000, list Rovinj. Savezni geološki zavod, Beograd

Polšak, A. & Šikić, D. (1973): Tumač za list Rovinj (OGK 1:100 000). Savezni geološki zavod, Beograd

Pravilnik o utvrđivanju zona sanitarne zaštite izvorišta, Narodne novine 55/2002

Pravilnik o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta (Narodne novine 66/2011, 47/2013)

Rubinić, J. (1995): Plan natapanja na području istarskih slivova - hidrologija. JVP za slivno područje istarskih slivova, Labin

Rudarsko, geološki i naftni fakultet (2003): Istraživanje u cilju zaštite izvorišta vodoopskrbe na području Istarskog poluo-
toka, Zagreb

Vidaček, Ž., Bogunović, M., Husnjak, S., Sraka, M., Bensa, A. & Petošić, D. (2004): Tumač hidropedološke karte Republike Hrvatske, M 1:300 000. Zavod za pedologiju, Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 33 str.

Zaninović, K., Gajić-Čapka, M., Perčec Tadić, M., Vučetić, M., Milković, J., Bajić, A., Cindrić, K., Cvitan, L., Katušin, Z., Kaučić, D., Likso, T., Lončar, E., Lončar, Ž., Mihajlović, D., Pandžić, K., Patarčić, M., Srnec, L. & Vučetić, V. (2008): Klimatski atlas Hrvatske, 1961. - 1990. : 1971. - 2000. Monografija, Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb