

PRIMJENA VIŠEKRITERIJSKE ANALIZE U SVRHU ODABIRA OPTIMALNE METODE PROCJENE PRIRODNE RANJIVOSTI KRŠKIH VODONOSNIKA

dr. sc. Jelena Loborec, dipl. ing. geoteh.
Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin

doc. dr. sc. Bojan Đurin, dipl. ing. geoteh.
Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin
bojan@gfv.hr

Metode procjene prirodne ranjivosti temelje se na pretpostavci da prirodna fizička, kemijska i biološka obilježja vodonosnog sustava mogu pružiti određeni stupanj zaštite podzemne vode od onečišćenja. Problem primjene različitih metoda procjene ranjivosti na istom su području relativno velike razlike u konačnim rezultatima koje su posljedica određene subjektivnosti u procjenama kao i problem dostupnih podataka. Zbog toga se sve više pažnje posvećuje primjeni odgovarajućih metoda verifikacije rezultata procjene ranjivosti, a sve počinje od odabira optimalne metode. U ovom će radu biti prikazani rezultati primjene četiriju metoda procjene ranjivosti (SINTACS, EPIK, PI i COP) na krškom vodonosniku u Hrvatskoj, slivu izvora Jadra i Žrnovnice. Zatim će biti predstavljen postupak primjene višekriterijske analize metodom PROMETHEE kojom su razmatrana različita obilježja pojedinih metoda. Na taj način se nastojala rangirati i izdvojiti najprihvatljivija metoda za primjenu na istraživanom području. Tako prikazani postupak mogao bi poslužiti kao standardna metoda odabira optimalne metode koja će biti primijenjena na području istraživanja, a sve sa svrhom verifikacije rezultata procjene prirodne ranjivosti u krškim vodonosnicima.

Ključne riječi: prirodna ranjivost, krški vodonosnik, Jadro, Žrnovnica, višekriterijska analiza, verifikacija

1. UVOD

Osiguravanje dovoljne količine pitke vode zadovoljavajuće kvalitete postaje glavni problem današnjice kao i osnova budućeg razvoja. Gotovo polovica državnog teritorija Republike Hrvatske izgrađuju okršene karbonatne stijene, a one predstavljaju spremnik velikih količina podzemne vode izrazite kakvoće. Zbog toga je potrebno mnogo pažnje posvetiti njihovoj zaštiti. U svijetu se metode procjene prirodne ranjivosti sve više koriste kao jedan od alata u definiranju odgovarajuće zaštite podzemne vode u kršu.

Počeci procjene ranjivosti podzemnih voda na onečišćenje datiraju još iz sedamdesetih godina dvadesetog stoljeća kad je Margat (1968.) prvi predstavio taj termin. Vrba i Zaporozec su zatim (1994.) ranjivost definirali kao kvalitativno, relativno, nemjerljivo i bezdimenzionalno svojstvo vodonosnog sustava te objasnili da su neka područja zbog svojih prirodnih obilježja ranjivija na antropogene

utjecaje od drugih. Nadalje su znanstvenici diljem svijeta razvijali različite metode procjene ranjivosti. Primjenom više različitih metoda na istom području istraživanja dobili bi se vrlo različiti rezultati ranjivosti (karte ranjivosti), stoga je utvrđena potreba da se metodologija ujednači i time subjektivnost odabira metode svede na minimum. Korak bliže ka tome bilo je predstavljanje okvirnog pristupa procjene ranjivosti, opasnosti i rizika u rezultatima projekta COST 620, „Kartiranje ranjivosti i rizika za zaštitu karbonatnih (krških) vodonosnika“ Zwahlen (2004.) kojima se ujednačio postupak odabira podataka i njihovo vrednovanje te omogućila usporedba rezultata dobivenih primjenom metoda na različitim područjima. Uz to, sve se više pažnje posvećuje tome da se utvrdi način na koji bi se objektivno moglo procijeniti koja je od primijenjenih metoda najprikladnija za istraživano područje, tj. čiji rezultati najviše odgovaraju realnom stanju. Taj se postupak

naziva validacija rezultata procjene prirodne ranjivosti i verifikacija odabranog modela (Neukum et al. 2008.).

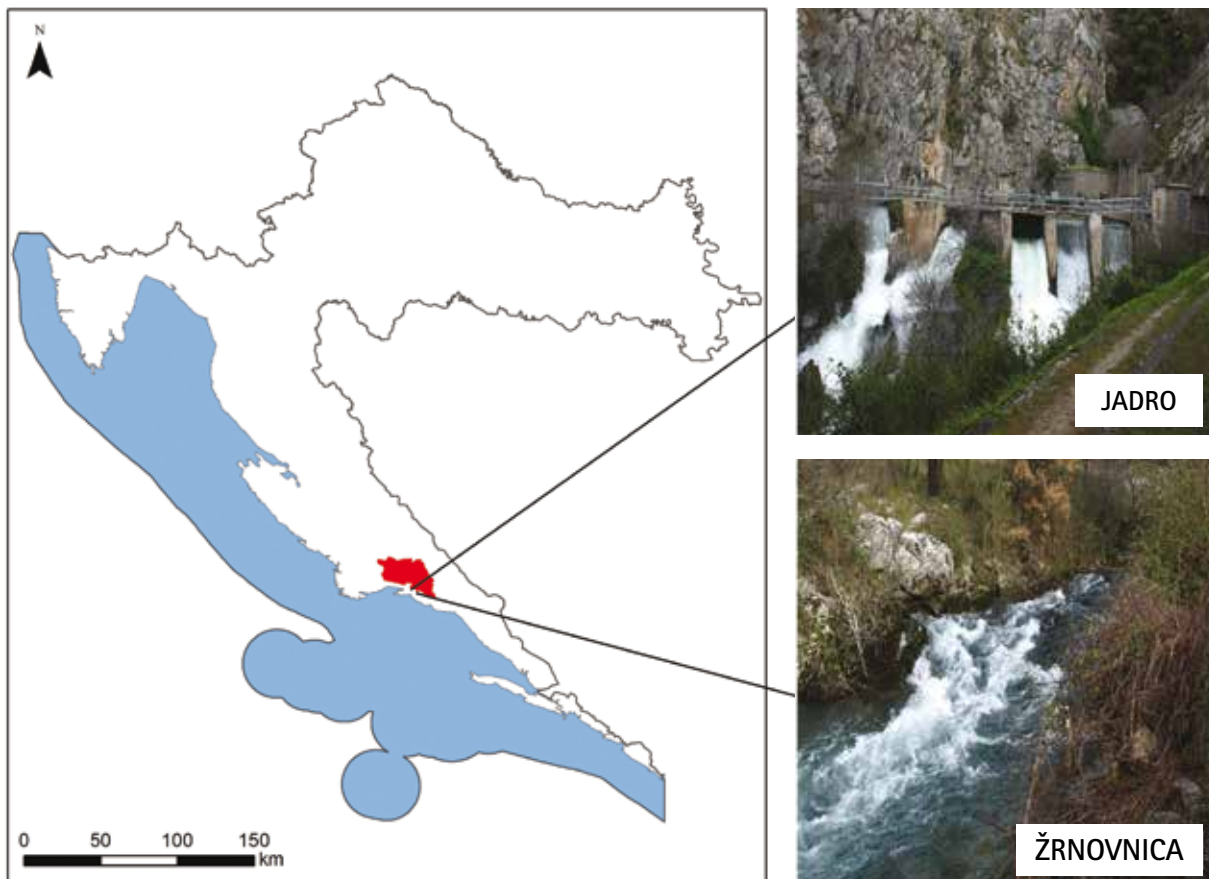
Glavni cilj ovog rada je prikazati postupak primjene višekriterijske analize za validaciju karata ranjivosti dobivenih pomoću četiri različite metode: SINTACS (Civita i De Maio, 2000.), EPIK (Doerflinger et al. 1999.), PI (Goldscheider, 2005.) and COP (Vias et al. 2006.) na primjeru jednog vodonosnika u Dinarskom kršu, u Hrvatskoj.

2. OSNOVNE ZNAČAJKE PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

Slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice jedno je od većih vodonosnih sustava u Dinarskom tipu krša, kao dio još većeg sustava, sliva rijeke Cetine. Izvori Jadro i Žrnovnica smješteni su u podnožju planina Mosor i Kozjak u zoni dodira karbonatnih naslaga splitske Zagore i obalnog fliškog pojasa, Jadro na 33, a Žrnovnica, sa više manjih izvora u rasponu od 77 - 90 metara iznad morske razine (slika 1). Prema raspoloživim hidrološkim podacima izdašnost izvora Jadro je obično najmanja u ljetnim mjesecima kada je moguće da srednji mjesečni protok bude i manji od 4,0 m³/s (Kapelj et al. 2006.). Upravo u tom sušnom razdoblju, radi pojačane potrošnje, poraste zahvaćanje vode s izvora Jadro za potrebe vodoopskrbe, jer se radi o vremenu trajanja turističke sezone, pa se umjesto dopuštenih 2,0 m³/s tada zahvaća i do 2,9 m³/s. Minimalna izmjerena izdašnost izvorišta Žrnovnice iznosi 250 l/s (Kapelj et al. 2012.).

Područje sliva površine preko 560 km² izgrađeno je uglavnom od karbonatnih stijena, vapnenaca i dolomita i naslaga fliša, a ostale naslage zastupljene su u manjoj mjeri. Dominiraju razlomljeni i vrlo okršeni vapnenci jure, krede i eocena. Karbonatne stijene mlađeg mezozoika (kreda) izgrađuju preko 75 % površine istraživanog područja. Tercijarne i kvartarne stijene i naslage izgrađuju manje od 18 % područja (točnije 17,85 %), dok ostale (perm, trijas i jura) zauzimaju samo oko 7 % površine sliva. Područje sliva pripada tipu krša u kojem je zastupljeno mnoštvo krških fenomena. Izrazita razlomljenost terena omogućila je intenzivno okršavanje karbonatnih stijena. U području rasprostiranja karbonatnih stijena nema površinskih tokova, već sva oborinska voda vrlo brzo ponire u podzemlje, dok u područjima krških polja postoje povremeni površinski tokovi koji ubrzo koncentrirano poniru u ponore na rubovima krških polja (Kapelj et al. 2006.).

Oba izvora koriste se u vodoopskrbi i nezamjenjiv su izvor pitke vode za oko 300 000 stanovnika. Područje sliva izvora Jadra i Žrnovnice posljednjih je godina doživjelo određeni gospodarski razvoj izgradnjom brojnih poslovnih, uslužnih, prometnih i gospodarskih objekata (Loborec et al. 2015.). To, zajedno s ranije spomenutim prirodnim obilježjima, čine ovaj prostor izrazito ranjivim na antropogeni utjecaj, te zahtijeva poseban pristup u definiranju odgovarajuće zaštite podzemnih voda ovog područja.



Slika 1. Položaj sliva i prikaz izvora

3. PROCJENA PRIRODNE RANJIVOSTI

3.1. Prikaz korištene metodologije

SINTACS metoda (Civita i De Maio, 2000.), ranjivost procjenjuje preko sedam parametara: dubina do podzemne vode (S), utjecaj efektivne infiltracije (I), kapacitet zadržavanja u nezasićenju (N), kapacitet zadržavanja u tlu (T), hidrogeološke karakteristike vodonosnika (A), raspon koeficijenta hidrauličke vodljivosti (C) i hidrogeološka uloga nagiba terena (S). Svaki parametar ima vrijednosti između 1 i 10, gdje veća vrijednost označava veću ranjivost. Uz to, SINTACS nudi pet mogućih scenarija površinskih uvjeta "normalni uvjeti", "veliko opterećenje", "procjeđivanje", "krš" i "raspucale stijene", koji omogućavaju primjenu SINTACS metode na različitim tipovima vodonosnika. Konačni indeks ranjivosti je zbroj svih parametara pomnoženih s pripadajućim težinskim koeficijentima.

EPIK metoda (Doerflinger et al. 1999.) se temelji na proučavanju četiri osnovne značajke krških sustava: epikrška zona, pokrovne zaštitne naslage, uvjeti infiltracije i stupanj okršnosti sustava. Svaka od opisanih značajki predstavlja jedan parametar E, P, I i K u procjeni prirodne ranjivosti vodonosnika. Zbroj svih parametara pomnoženih s pripadajućim težinskim vrijednostima ulazi u izračunu konačnog zaštitnog faktora.

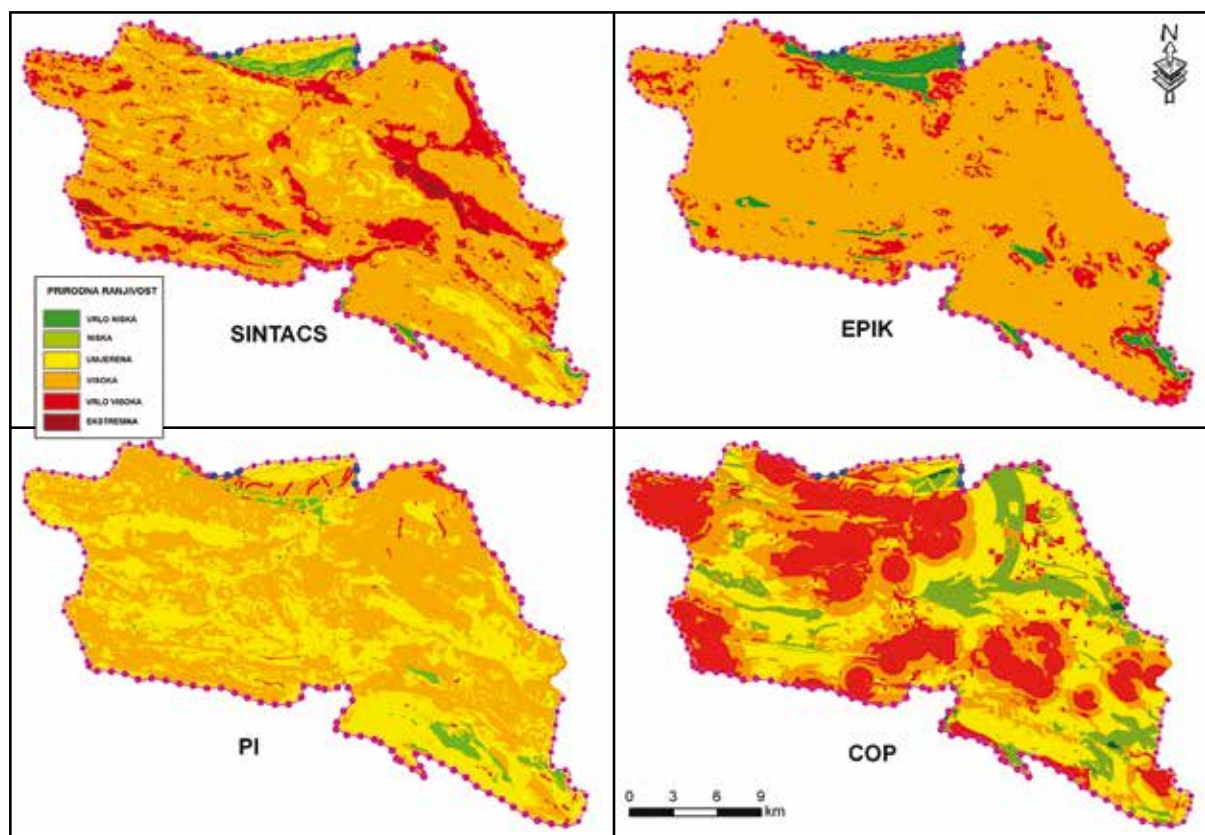
PI metoda (Goldscheider, 2005.) na prvi pogled djeluje kao najjednostavnija jer procjenjuje samo dva parametra, funkciju zaštitnog pokriva (P) i infiltracije

uvjetima (I). No, ona je vrlo detaljno razrađena i uključuje više podfaktora nego prethodno predstavljene metode. Prirodna ranjivost PI metodom dobiva se množenjem pojedinačnih faktora P i I. Kao umnožak predstavljen je faktor zaštite – π , s rasponom vrijednosti od 0 do 5, gdje veće vrijednosti prikazuju veću prirodnu zaštitu, odnosno manju ranjivost vodonosnika od onečišćenja s površine.

COP metoda (Vías et al. 2006.) je najmlađa od svih primijenjenih metoda i potpuno je usklađena (metodološki i terminološki) sa smjericama predloženima projektom COST 620. Zasniva se na vrednovanju tri parametra koja opisuju ranjivosti vodonosnika: krovinske naslage (O), koncentracija toka (C) i režim oborina (P). Parametar O predstavlja zaštitnu ulogu, a faktori C i P smanjuju taj stupanj zaštite. Konačni indeks COP dobiva se množenjem ta tri faktora.

3.2. Procjene prirodne ranjivosti na slivu izvora Jadro i Žrnovnica

Prirodna ranjivost promatranog sliva procijenjena je korištenjem četiri različite metode te su njihovi rezultati uspoređeni (Kapelj et al. 2013.; Loborec, 2013., Loborec et al. 2014.). Najprije je prikazana procjena pomoću SINTACS metode. Osim primjene standardne metode tada je testiran i utjecaj vrtača na prirodnu ranjivost. Naime, vrtače se smatraju dodatnim pokazateljem okršavanja, a time mogu ukazati na bolje propusna područja (Ford i Williams, 2007.), što uvelike utječe na procjenu prirodne



Slika 2. Karte ranjivosti dobivene primjenom četiri metode (SINTACS, EPIK, PI i COP)

ranjivosti. Zato je predložena modifikacija metode koja takvu kartu uzima u obzir kao dodatni pokazatelj propusnosti. Radi se o izdvajanju vrtača kao pojedinačnih točkastih objekata iz topografskih podloga, te izračunu prostorne gustoće vrtača, kao broj vrtača na prostoru 250 x 250 metara, prikazane u obliku karte gustoće vrtača koja je kombinirana sa standardnom procjenom parametra C (Kapelj et al. 2013; Loborec, 2013). Tako modificirana vrijednost parametra C je uključena u izračun indeksa ranjivosti i za dobivanje karte ranjivosti po SINTACS metodi (slika 2).

Kod primjene EPIK metode na području istraživanja problematičan se pokazao parametar E - epikrška zona. Prema preporukama metode, preko geomorfoloških obilježja krša procjenjuje se razvoj epikrške zone, što uvjetuje visoku ranjivost na tim područjima. Budući da je na slivnom području rasprostranjeno mnoštvo geomorfoloških oblika, glavina sliva ima vrlo visoku ranjivost. Ako se kao pokazatelj razvoja epikrške zone uključi karta gustoće vrtača, koja mnogo preciznije i detaljnije zonira područja s izrazito razvijenom epikrskom zonom, rezultati procjene postaju prihvatljiviji (slika 2).

Kod PI metode je također uzeta u obzir gustoća vrtača prilikom procjene podfaktora F (raspucanost stijena), ali nije bilo značajnijeg utjecaja ove modifikacije na konačnu kartu ranjivosti. Kod primjene ove metode sporna je točka definiranje parametra I, gdje je sve provedeno u skladu sa smjericama metode, no kao rezultat je dobiveno da je dominantni tok na slivu površinsko otjecanje, što je u uvodnom dijelu rada objašnjeno kao izrazito rijetko. Budući da su u ovoj procjeni korišteni podatci tla iz Hidropedološke karte Republike Hrvatske mjerila 1: 300 000 (Vidaček et al. 2004.), smatra se da bi rezultate trebalo uzeti s rezervom i predlaže se provesti detaljna istraživanja o karakteristikama tla na ovom prostoru (slika 2).

Metoda COP se kod primjene pokazala kao vrlo pristupačna metoda, te se uz neke manje modifikacije uspjela vrlo dobro prilagoditi istraživanom području. Procjena parametra O je slična onoj predloženoj u PI metodi, ali je bolje prilagođena raspoloživim podacima. Također, po standardnoj metodi parametar C definira zonu utjecaja ponora 5000 metara, što je u ovom slučaju previše, zbog brze infiltracije vode u podzemlju, što je dodatno modificirano kako bi se ta udaljenost smanjila. Faktor oborina također je dodatno modificiran.

3.3. Uspoređivanje rezultata procjene prirodne ranjivosti

Usporedbom rezultata procjene prirodne ranjivosti, dobivenih pomoću četiri metode, utvrđene su sličnosti i razlike. Kod SINTACS metode razmjerno je veliki broj parametara procjene kod kojih je važno precizno odrediti svaku veličinu jer ulazi u konačni izračun indeksa ranjivosti. No, u kršu ne postoje detaljna mjerenja nekih značajki (primjerice dubine do podzemne vode, infiltracije, debljine pokrova tla, hidrauličke vodljivosti). Njihova interpolacija na vrlo heterogenom i anizotropnom

području, kao što je dinarski krš, je nažalost samo gruba pretpostavka. Pozitivna strana SINTACS metode svakako je u težinskim faktorima koji omogućuju maksimalnu prilagodbu površinskim uvjetima na slivu. SINTACS metoda kao najranjivije dijelove sliva izdvaja nizinska područja s malim nagibima terena koja sakupljaju vodu s viših dijelova i provode u podzemlje. No pri tome ne uzima u obzir ponore kao posebno ranjiva mjesta. Značajna je i uloga infiltracije za konačni izračun ranjivosti, budući da je njen težinski faktor utjecaja maksimalan. Ipak, važno je istaknuti da se prema preporukama metode negativna uloga infiltracije smanjuje s većim količinama infiltrirane vode u podzemlje, jer nastupaju procesi razrjeđenja onečišćenja. Takvo je objašnjenje i za P faktor u COP metodi, jedino se u PI metodi porastom količine oborina ranjivost stalno povećava.

EPIK metoda je primjenjiva u području s vrlo ograničenom bazom podataka za koju se želi odrediti neki globalni prikaz i dobiti općeniti uvid u ranjivost nekog područja. U slučaju sliva Jadra i Žrnovnice primjenom osnovne EPIK metode dosta je precijenjena ranjivost jer je više od polovice sliva dospjelo u vrlo visoku klasu ranjivosti. Situacija se malo promijenila kad se epikrška zona definirala pomoću rastera gustoće vrtače. Budući da je već utvrđeno da prisutnost vrtača ukazuje na razvijenost epikrške zone, takav je postupak posve opravdan, ali u oba slučaja vrtače su uzete u obzir, a rezultat je znatno različit, što ukazuje na veliku subjektivnost metode. EPIK metoda uzima u obzir parametar utjecaja infiltracije, ali napomenuto je da se ti uvjeti ne odnose na količinu vode koja se infiltrira, tako da se nigdje u metodi ne uvrštavaju količine oborina. Daljnja zamjerka metodi je što procjenjuje zaštitnu funkciju naslaga tla. Naime, maksimalna zaštitna funkcija tla, definirana je za područja na kojima je debljina tla iznad dobro propusnih vapnenaca veća od 2 m, što prema raspodjeli klasa ranjivosti odgovara niskoj ranjivosti (bez obzira na ostale parametre).

PI metoda i COP metoda vrlo su slične. Osnovna razlika između njih je što COP metoda procjenjuje zasebno parametar oborina (P), dok ga PI metoda uključuje u procjenu parametra pokrovnih naslaga (podfaktor R). Osim toga, podfaktor R djeluje tako da se kod većih količina oborina zaštitna funkcija pokrovnih naslaga smanjuje, dok je P faktor COP metode definiran tako da u obzir uzima razrjeđenje i kod većih količina oborina smanjuje negativni utjecaj faktora P. U dinarskom tipu krša (prema Biondić et al., 2008.; Biondić et al., 2009.; Meaški, 2011.) vjerojatnije je da se kod većih količina oborina ranjivost povećava jer se onečišćenje prenosi na veće udaljenosti, veća je mogućnost formiranja bujičnih tokova, a dolazi i do jačeg ispiranja epikrške zone. Druga glavna razlika je kod definiranja uvjeta infiltracije, gdje COP metoda definira utjecaj ponora do 5000 m i na cijelom tom području promatra se površinsko otjecanje, a PI metoda uzima u obzir samo zonu 10 m oko ponora. I treća razlika je definiranje pokrovnih naslaga. Kod PI

metode prisutna su tri sloja unutar nezasićene zone (tlo, podtlo i stijena), a kod COP metode dva (tlo i stijena), što je zbog dostupnih podataka povoljnije. Također, razlika je u definiranju uloge tla koji se kod PI metode određuje preko sadržaja aktivne vode u tlu dostupne biljkama, a kod COP metode na temelju teksture i debljine, što je prihvatljivije.

3.4. Potreba validacija karata ranjivosti

Vrlo važan dio procjene ranjivosti vodonosnika je analiza rezultata i ocjena njihove pouzdanosti temeljem stvarnih pokazatelja stanja. Dosad je objavljeno mnogo radova u kojima se na nekom području istraživanja primjenjivalo više metoda za procjenu ranjivosti s ciljem odabira najpogodnije metode (Gogu et al., 2003.; Vías et al., 2005.; Neukum i Hötzl, 2007.; Neukum et al., 2008.; Ravbar i Goldscheider, 2009.). Pri tome se uvijek potvrđivalo da je ranjivost relativno svojstvo, a procjena ovisi o korištenim parametrima, dostupnim podatcima i izboru metode. Neukum i Hötzl (2007.) u svom radu predlažu reklasifikaciju karata ranjivosti dobivenih različitim metodama na jednu jedinstvenu podjelu preko percentilne distribucije, čime bi se omogućilo ujednačavanje postupka procjene ranjivosti bez mijenjanja ulaznih parametara. Na taj način rezultati imaju minimalna odstupanja, čime se olakšava odabir najpogodnije metode. U svakom od slučajeva testiranja metoda istaknuta je potreba za uspostavljanjem standardnog pristupa ocjene rezultata, što se naziva validacija rezultata analize ranjivosti.

U spomenutim radovima predloženo je nekoliko metoda validacije, od kojih su učestale korištenje rezultata terenskih istraživanja (najčešće trasiranje umjetnim traserima, ali i analiza hidrodinamičnih odnosa u slivu i analize prirodnih trasera) (Goldscheider et al. 2001.; Perrin et al., 2004.). Uz to se predlažu i različite numeričke metode kao i kombinacije spomenutih (Napolitano i Fabbri, 1996.; Gogu i Dassargues, 2000.; Neukum et al., 2008.; Holman et al., 2005.). Pri izboru odgovarajuće metode validacije dobivene karte ranjivosti važno je uzeti u obzir veličinu sliva. Goldscheider et al. (2001.) napominju da su rezultati trasiranja pogodni za validaciju manjih slivova. Perrin et al. (2004.) na slivu površine 20 km² koriste tri različita trasera od kojih se jedan ubacuje u ponor (na mjestu koncentrirane infiltracije), drugi se raspršuje po određenom dijelu površine (simulira se difuzna infiltracija), dok se treći nanosi po površini nepropusnih naslaga (površinsko otjecanje i alogeno napajanje vodonosnika). Opažanjem pojave sva tri trasera na promatranim izvorima testira se vjerodostojnost rezultata ranjivosti. Sličnu metodu koristili su Ravbar i Goldscheider (2007.) kada su na slivu površine 9 km² validirali rezultate analize ranjivosti simultanim trasiranjem iz različitih zona ranjivosti.

Važnost razvoja pristupa validacije rezultata ranjivosti istaknuli su i Loborec et al. (2014.).

4. METODOLOGIJA VIŠEKRITERIJSKE ANALIZE UZ PRIMJENU METODE PROMETHEE

4.1. Općenito

Višekriterijska analiza je matematički alat donošenja odluka koji omogućuje usporedbu različitih alternativa ili scenarija prema različitim kriterijima (često proturječnim), koji donositelja odluke usmjeravaju prema ispravnom odabiru odluke. Višekriterijska analiza provodi se korištenjem višekriterijskih metoda (Roy, 1996.). Višekriterijske metode omogućavaju postavljanje različitih opcija i definiranje njihovog odnosa sa različitim kriterijima, što u konačnici zahtijeva određenu procjenu. Višekriterijske metode međusobno se razlikuju u načinu obrade ulaznih podataka. Najčešće se radi o definiranju sustava relativnih težina za različite kriterije (DCLG, 2009.). Glavni zadatak višekriterijskih metoda je rješavanje problema koje donositelji odluka imaju kod obrade velike količine složenih informacija s težnjom dosljednosti i sistematičnosti. Višekriterijske metode primjenjuju se kod određivanja pojedinačne željene opcije, kod rangiranja opcija, kod smanjenja broja opcija za naknadne analize, odnosno za razlikovanje prihvatljivog rješenja od neprihvatljivog (DCLG, 2009.).

U najopćenitijem slučaju, promatra se jednokriterijski problem (Mladineo, 2009.):

$$\text{Max}\{f(a) \mid a \in A\} \quad (1)$$

gdje su: A skup mogućih akcija (alternativa), dok je $f:A \rightarrow R_1$ kriterij koji razlikuje te akcije.

Rješenje ovog problema je totalni poredak u skupu A.

Višekriterijski problem definira se kao (Mladineo, 2009.):

$$\text{Max}\{f_1(a), \dots, f_j(a), \dots, f_k(a) \mid a \in A\} \quad (2)$$

pri čemu je $f_j(a)$, $j=1,2,\dots,k$, gdje je k broj kriterija.

U ovom slučaju se ne može dobiti rješenje u obliku totalnog poretka u skupa A. Međutim, ovakvi (višekriterijski) problemi se mogu riješiti. Neka su a i b dvije akcije iz skupa A tako da vrijedi $f_j(a) \geq f_j(b)$, $\forall j \in (1,2,\dots,k)$, pri čemu je barem jedna nejednakost stroga. Tada vrijedi da a dominira nad b. Na taj se način dobiva parcijalni poredak u A (tranzitivna relacija) koji se zove poredak dominacije. Pretpostavi se da su akcije iz A ponovo čvorovi grafa, luk (ab) postoji ako a dominira nad b, te tako dobivamo graf dominacije (usmjeren graf).

Postoje različite podjele višekriterijskih metoda. Uzevši u obzir problematiku analiziranu u ovom radu, spomenut će se podjela prema (Laet al., 2008.) na Elementarne metode, Pojedinačni kriterijski pristup, Metode "višeg ranga", Metode cilja ili referentne točke i Teoriju "Fuzzy" skupa. Metoda PROMETHEE spada u skupinu metoda "višeg ranga". Opravdanost navedene

metode vidljiva je u prikladnosti i prilagodljivosti primjene na opisanu problematiku odabira optimalne metode procjene prirodne ranjivosti kao i u mogućnosti informatičke (softverske) podrške imajući u vidu programski paket Visual PROMETHEE Academic Edition 1.4.© Bertrand Mareschal (Mareschal, 2014.).

4.1. Metoda PROMETHEE

Ova metoda koristi princip "višeg ranga" u svrhu rangiranja alternativa u kombinaciji s jednostavnošću uporabe i smanjenjem složenosti. Drugim riječima, izvršava se paralelna usporedba alternativa u svrhu njihovog rangiranja u odnosu na broj kriterija (Laet al., 2008).

Za metodu PROMETHEE karakteristična su sljedeća tri segmenta:

- Obuhvat kriterija

Oblikovanje preferencija donositelja odluke bit će modificirano na način da će se za svaki kriterij promatrati šest mogućih obuhvata (funkcija preferencije) zasnovanih na intenzitetu preferencije. Neke od njih dopuštaju netranzitivnost indiferencije, dok druge nude blagi prijelaz iz indiferencije u strogu preferenciju.

- Procijenjena relacija "višeg ranga"

Upotreba kriterija definiranih na način kao što je definirano u prethodnoj točki dozvoljava konstrukciju procijenjene relacije "višeg ranga". Ova relacija bit će manje osjetljiva na male promjene parametara i njena interpretacija će biti jednostavna.

- Korištenje relacije "višeg ranga"

Pod ovim pojmom razmatrat će se specifično korištenje procijenjene relacije "višeg ranga", naročito u slučaju kada akcije moraju biti rangirane od najbolje do najgore. Metoda Promethee I omogućava djelomično rangiranje akcija. Potpuno rangiranje dobije se pomoću metode Promethee II.

Obuhvat kriterija temelji se na uvođenju funkcije preferencije koja daje preferenciju donositelja odluke za akciju a u odnosu na akciju b . Ova će funkcija biti definirana za svaki kriterij posebno; njena će se vrijednost kretati između 0 i 1. Što je manja vrijednost funkcije, veća je indiferencija donositelja odluke; što je ta vrijednost bliže 1, veća je njegova preferencija. U slučaju stroge preferencije vrijednost funkcije preferencije bit će jednaka 1 (Mladineo, 2009.).

Neka je f određeni kriterij, a a i b dvije akcije (alternative) iz skupa akcija A . Pridružena funkcija preferencije $P(a,b)$ od a u odnosu na b bit će definirana kao:

$$P(a,b) = \begin{cases} 0, & \text{ako je } f(a) \leq f(b) \\ p[f(a), f(b)] & \text{ako je } f(a) > f(b) \end{cases} \quad (3)$$

Za konkretne slučajeve potrebno je izabrati funkcije p tipa

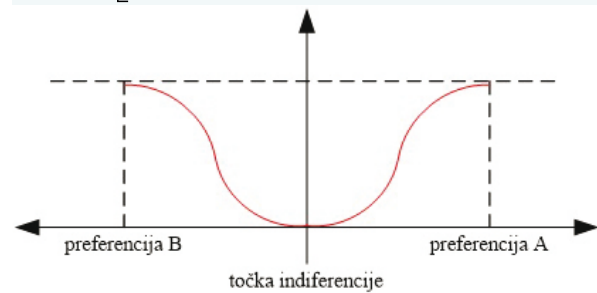
$$p[f(a), f(b)] = p[f(a) - f(b)] \quad (4)$$

kod kojih je p u ovisnosti o razlici između vrijednosti $f(a)$ i $f(b)$. Područja indiferencije d u okolini $f(b)$ definira se preko:

$$d = f(a) - f(b) \quad (5)$$

Izraz (5) predočava funkciju $H(d)$ (slika 3):

$$H(d) = \begin{cases} P(a,b), & \text{ako je } d \geq 0 \\ P(a,b), & \text{ako je } d \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$



Slika 3. Prikaz funkcije $H(d)$

Prema Mladineo (2009.) i Mareschal (2014.) definirano je šest kriterija: običan kriterij, kvazi kriterij ("U" oblik funkcije preferencije p), kriterij s linearnom preferencijom ("V" oblik funkcije preferencije p), kriterij razina, kriterij s linearnom funkcijom preferencije i područjem indiferencije te Gaussov kriterij. Svaki od njih razlikuje se s obzirom na definiranje/postavljanje i odabir praga (parametra) za donošenje odluke.

Idući korak je procjena relacije "višeg ranga". Za svaki par akcija $a, b \in A$, prvo se definira višekriterijalni indeks preferencije za a u odnosu na b za sve kriterije. Pretpostavlja se da je svaki kriterij identificiran kao jedan od razmotrenih tipova kriterija, tako da su funkcije preferencije $P_j(a,b)$ definirane za svaki $j=1,2,\dots,k$. Višekriterijalni indeks preferencije $\Pi(a,b)$ definiran je sljedećim izrazom:

$$\Pi(a,b) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k P_j(a,b) \quad (7)$$

gdje je k broj kriterija.

Ako se pretpostavi da se funkcije preferencije $P_j(a,b)$ i ponderi (težine) kriterija W_j specificiraju za svaki kriterij $j=1,\dots,k$, tada se za $\forall a, b \in A$ višekriterijalni indeks preferencije $\Pi(a,b)$ definira kao:

$$\Pi(a,b) = \frac{\sum_{j=1}^k W_j P_j(a,b)}{\sum_{j=1}^k W_j} \quad (8)$$

gdje je W_j ponder (težina) kriterija.

Ako donositelj odluke želi rangirati akcije iz A od najbolje do najlošije, to je onda problem rangiranja. Ako donositelj odluke mora izabrati najbolje akcije iz A , govori se o problemu izbora. Budući da kod višekriterijalnog problema općenito nema najboljeg rješenja, problem će se sastojati od određivanja skupa dobrih akcija iz A .

U tu svrhu upotrijebit će se dvije tehnike rješavanja problema rangiranja, pri čemu se rangiranjem može dobiti i skup dobrih akcija kao rješenje problema izbora.

To su metoda PROMETHEE, odnosno metoda Promethee I i metoda Promethee II.

Kod metode Promethee I radi se o rangiranju akcija djelomičnim poretkom. Ako se definira procijenjena relacija "višeg ranga", za svaki čvor a , na osnovu višekriterijalnog indeksa preferencije za svaki $a \in A$ dobiju se sljedeći tokovi:

• Izlazni tok:

$$\Phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \Pi(a, x) \quad (9)$$

• Ulazni tok:

$$\Phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \Pi(x, a) \quad (10)$$

Što je veći izlazni tok, to a više dominira nad ostalim akcijama iz A ; što je manji ulazni tok, to manje akcija dominira nad a . Neke akcije će biti usporedive, a neke neusporedive, tako da metoda Promethee I daje djelomične relacije odnosno procijenjenu relaciju "višeg ranga" koji donositelju odluke daje značajne informacije o odnosima među akcijama.

Kod metode Promethee II radi se o rangiranju akcija potpunim poretkom (potpuno rangiranje bez neusporedivosti). Za svaku akciju $a \in A$ promatra se rezultirajući (netto) tok:

$$\Phi(a) = \Phi_+(a) - \Phi_-(a) \quad (11)$$

koji se koristi u rangiranju akcija:

- a ima viši rang od b ($aP(2)b$) akko $\Phi(a) > \Phi(b)$;
- a je indiferentno b ($aI(2)b$) akko $\Phi(a) = \Phi(b)$.

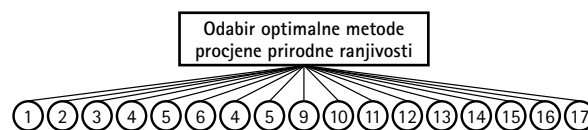
U metodi Promethee II definirana je potpuna relacija kod koje su sve akcije iz A potpuno rangirane, uz napomenu da se kod ove relacije gubi dio informacija zbog balansirajućih efekata između izlaznog i ulaznog toka, što rezultira većim stupnjem apstrakcije (Mladineo, 2009.).

5. PRIMJENA I REZULTATI VIŠEKRITERIJSKE ANALIZE ZA VALIDACIJU KARATA RANJIVOSTI

5.1. Analiza problematike i definiranje ulaznih parametara

Validacija karata ranjivosti podložna je subjektivnoj procjeni ulaznih parametara, a u konačnici i subjektivnom odabiru optimalne metode, budući da se određeni ulazni parametri ne mogu usporediti na osnovu kvantitativnih pokazatelja. Očito je da problem usporedbe pojedine metode validacije karata ranjivosti spada u višekriterijalnu analizu, budući da izbor optimalne metode ovisi o više kriterija, što se vidi iz opisa samih metoda. Zbog navedenih razloga primjena metode PROMETHEE prikladna je za rješavanje ovakvih problema. Na slici 4 prikazana je hijerarhijska struktura ciljeva i

kriterija koji definiraju višekriterijsku analizu navedene problematike.



Slika 4. Hijerarhijska struktura analiziranog problema

Tablica 1 prikazuje pojedini kriterij kao i pregled ocjena svake od četiriju analiziranih metoda procjene ranjivosti. Ocjena pojedinačnih kriterija dane su na osnovu rezultata analize ekspertne skupine. Pojedini kriteriji vrednovani su u njihovom međuodnosu ocjenama od 1 do 4, gdje veća ocjena predstavlja prikladniju verziju tog kriterija (prema metodi). Ponderi (težine) svakog od 17 kriterija postavljeni su na jednaku vrijednost (5.88 % za svaki kriterij) u svrhu ujednačenosti kriterija, odnosno u svrhu otklanjanja subjektivnosti ove analize. Prvih šest kriterija odnosi se na obilježja metode, dok se ostali odnose na obilježja pojedinačnih parametara i to preko uvjeta u podzemlju i vanjskih utjecaja. Ocjenjivanje je napravljeno na sljedeći način:

1. **Vrsta metode** – odnosi se na sustav bodovanja pojedinih parametara metode i mogućnost primjene metode na izvor ili vodonosnik (*eng. source* ili *resource*). Najveću ocjenu dobila je SINTACS metoda jer je metoda s težinskim koeficijentima i prilagodljiva je.
2. **Broj procijenjenih parametara** – opisuje kompliciranost metode. PI metoda je dobila najbolju ocjenu jer ima samo dva parametra koja se kompleksno procjenjuju i zbog toga su pouzdani, za razliku od SINTACS metode koja ima mnoštvo parametara, pri čemu svaki od njih ima težinski koeficijent i jako se ističe ako kojega nije moguće procijeniti.
3. **Procjena izravno iz uputa** – odnosi se na detaljnost uputa koje smanjuju mogućnost subjektivne interpretacije uvjeta procjene. Najveću ocjenu dobila je PI metoda jer se radi o izrazito kompliciranim procjenama s mnoštvom podfaktora i vrlo detaljnim objašnjenjima.
4. **Dostupnost traženih podataka** – ocjenjuje u kojoj su mjeri traženi podatci parametara izravno izvađeni iz izvora podataka ili su oni procijenjeni indirektno. Iako ni u jednoj metodi nisu baš svi podaci dostupni, u međuodnosu najveću ocjenu je dobila COP metoda.
5. **Mogućnost primjene metode na različitim područjima** – najbolju ocjenu dobila je SINTACS metoda upravo zbog svojih scenarija, a najlošiju EPIK metoda koja je isključivo primjenjiva u krškim područjima i nema mogućnosti prilagodbe.
6. **Generalizacija klasa dobivenih rezultata** – odnosi se na precizno razgraničenje pojedinih obilježja klase. EPIK metoda je tu najlošije ocijenjena jer koristi jako generalizirana područja.
7. **Dubina do podzemne vode** – odnosi se na definiranje

debljine nezasićene zone. SINTACS metoda je najbolje bodovana jer jedina vrednuje kao zaseban parametar, dok u EPIK metodi taj kriterij nema nikakvu ulogu.

8. Povezanost vodonosnika s površinskim vodama – kriterij se odnosi na vrednovanje metode koja najbolje definira način prihranjivanja vodonosnika. PI metoda je tu najdetaljnija.

9. Litologija nezasićene zone – vrednuje način na koji procjena građe nezasićene zone utječe na konačni ishod metode ranjivosti. PI metoda tu prednjači, dok EPIK uopće nema osvrt na to.

10. Arteški pritisak – odnosi se na definiciju tipa vodonosnika, radi li se o otvorenom, zatvorenom ili poluzatvorenom vodonosniku. SINTACS i EPIK ne uključuju to u procjenu.

11. Debljina tla – odnosi se na utjecaj definicije debljine tla te na mogućnost da se ista točno odredi ili procijeni.

12. Tekstura, mineralogija – kriterij koji boduje koliko precizno su definirano ta svojstva tla, te kako njihova procjena utječe na konačnu procjenu ranjivosti

13. Efektivna vlaga – kriterij boduje samo dvije situacije, kod PI metode je potrebno definirati ju, ali je određena preko nedostupnog podatka, dok ju ostale metode ne uzimaju u obzir.

14. Hidrogeološka obilježja vodonosnika – SINTACS metoda najbolje opisuje ovo obilježje, dok ga PI i COP uopće ne promatraju.

15. Oborine kao vanjski stres – COP metoda je najbolje bodovana jer sadrži zaseban parametar definicije oborina. EPIK metoda uopće ne koristi oborine kao ulazni podatak.

16. Korištenje zemljišta (pokrov) – SINTACS metoda nema podatke o pokrovu zemljišta, ostale metode su rangirane u odnosu na stupanj prilagodbe.

17. Topografija (nagib terena) – odnosi se na uključivanje nagiba terena u procjenu površinskog otjecanja i infiltracije. COP metoda je najbolje bodovana, dok EPIK metoda uopće ne koristi nagib terena kao ulazni podatak.

5.2. Dobiveni rezultati

U tablici 2 prikazana su rangiranja i pripadne vrijednosti Φ +, Φ -, te Φ , dobivene metodom Promethee I i Promethee II uz korištenje programskog paketa Visual PROMETHEE Academic Edition 1.4.© Bertrand Mareschal za sve četiri metode (COP, PI, SINTACS i EPIK).

Vidljivo je da se na osnovu potpunog rangiranja metoda preko pokazatelja Φ , jednadžba (11), metoda COP pokazala najprihvatljivijom. Tome u prilog idu i rezultati parcijalnog rangiranja na osnovu pokazatelja Φ + i Φ - (jednadžbe 9 i 10), gdje se metoda COP također pokazala najprihvatljivijom.

Tablica 1. Pregled kriterija i ocjena metoda SINTACS, EPIK, PI i COP

Kriterij	Metoda i pripadne ocjene			
	SINTACS	EPIK	PI	COP
1. Vrsta metode	4	3	1	2
2. Broj procijenjenih parametara	1	2	4	3
3. Detaljnost uputa	2	1	4	3
4. Dostupnost podataka	2	3	1	4
5. Mogućnost primjene u različitim područjima	4	1	2	3
6. Generalizacija klasa dobivenih rezultata	3	1	4	2
7. Dubina do podzemne vode	4	1	3	3
8. Povezanost vodonosnika s površinskim vodama	2	1	4	3
9. Litologija nezasićene zone	2	1	4	3
10. Arteški pritisak	1	1	3	4
11. Debljina tla	1	2	3	4
12. Tekstura, mineralogija	3	1	2	4
13. Efektivna vlaga	2	2	1	2
14. Hidrološka obilježja	4	3	1	1
15. Oborine kao vanjski stres	2	1	3	4
16. Korištenje zemljišta - pokrov	1	2	3	4
17. Topografija – nagib terena	2	1	3	4

Tablica 2. Rangiranja i pripadne vrijednosti Φ +, Φ -, te Φ za sve četiri metode.

Metode	Φ	Φ +	Φ -
COP	0.4118	0.6667	0.2549
PI	0.2157	0.5882	0.3725
SINTACS	-0.0784	0.4314	0.5098
EPIK	-0.5490	0.1961	0.7451

6. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

Metode procjene prirodne ranjivosti krških vodonosnika izložene su subjektivnim procjenama veličine ulaznih parametara, što je uobičajeni problem kod parametara koji se izražavaju kvalitativno. Zbog toga je izražena potreba razvoja jedinstvenog pristupa odabira i validacije korištene metode procjene ranjivosti, odnosno verifikacije dobivenih rezultata. Dosadašnji uobičajeni postupci usvajanja rezultata dobivenih određenom metodom u pravilu daju izvjestan stupanj subjektivnosti, što može rezultirati i pogrešnim usvajanjem stupnja ranjivosti vodonosnika. Samim time, sustavna analiza problema, kao i primjena metode koja ovakve nedostatke/ograničenja eliminira, predstavlja imperativ.

U ovom je radu pokazano da metoda Promethee, odnosno upotreba višekriterijskih metoda u određenoj mjeri otklanja navedeni stupanj subjektivnosti procjene, što prvenstveno ovisi o samim ulaznim podatcima (njihovom broju i kvaliteti) i načinu na koji se oni obrađuju u pojedinoj višekriterijskoj metodi. Samim time, prikazana i provedena sustavna analiza problema, odnosno postupak odabira optimalne metode procjene ranjivosti (u ovom slučaju metode COP) pokazali su se opravdanim i predstavljaju znanstveno inovativan te inženjerski primjenjiv pristup kojim bi se olakšala validacija procjene ranjivosti krških vodonosnika.

U današnje vrijeme većina programskih paketa koji analiziraju ovu problematiku pojednostavljaju navedeni problem te korisnika upućuju na način unašanja ulaznih podataka, odnosno način definiranja problema koji se rješava. Ujedno su izlazne veličine transparentno i korisnički jednostavno prikazane

i jednostavne za daljnju uporabu i korištenje. Uključenje još većeg broja sudionika u ovakvu metodologiju procjene i odabira optimalne metode procjene ranjivosti, odnosno uključenje različitih profila stručnjaka u ekspertnu skupinu svakako doprinosi još većoj objektivnosti dobivenih rezultata. ■

LITERATURA

- Biondić, B., Zojer, H., Yehdeghe, B., Biondić, R., Kapelj, S., Meaški, H. i Zwicker, G. (2008.): Održivo korištenje i zaštita vodnih resursa na području Plitvičkih jezera, Završno izvješće. *Arhiv Geotehničkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Varaždin*.
- Biondić, R.; Biondić, B. i Rubinić, J. (2009.): Ocjena stanja i rizika cjelina podzemnih voda na krškom području u Republici Hrvatskoj. Završno izvješće. *Arhiv Geotehničkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Varaždin*.
- Civita M. i 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.
- DCLG – Department for Communities and Local Government (2009.): *Multi-criteria analysis: a manual. Communities and Local Government Publications*, Wetherby, V. Britanija.
- Doerfliger N; Jeannin P.Y. i Zwahlen F. (1999.): Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). *Environmental Geology* 39 (2), 165–176.
- Ford, D.C. i Williams, P.W. (2007.): Karst Hydrogeology and Geomorphology. *John Wiley i Sons*, UK, 562 str.
- Gogu, R.C. i Dassargues, A. (2000.): Sensitivity analysis for the EPIK method of vulnerability assessment in a small karstic aquifer, southern Belgium. *Hydrogeology Journal* 8, 337–345.
- Gogu, R.C; Hallet, V. i Dassargues, A. (2003.): Comparison of aquifer vulnerability assessment techniques. Application to the Néblon river basin (Belgium). *Environmental Geology* 44, 881 – 892.
- Goldscheider, N. (2005.): Karst groundwater vulnerability mapping: application of a new method in the Swabian Alb, Germany. *Hydrogeology Journal* 13, 555–564.
- Goldscheider, N; Hötzl, H; Fries, W. i Jordan, P. (2001.): Validation of a vulnerability map (EPIK) with tracer tests. 7th Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media. *Besançon, Francia*, 167–170.
- Holman, I.P; Palmer, R.C; Bellamy, P.H. i Hollis, J.M. (2005.): Validation of intrinsic groundwater pollution vulnerability methodology using a national nitrate database. *Hydrogeology Journal*, 13, 665–674.
- Kapelj, S; Kapelj, J; Biondić, R; Biondić, B; Kovač, I; Tušar, B; Prelogović, E; Marjanac, T; Andrić, M; Kovačić, D; Strelec, S. i Gazdek, M. (2006.): Studija upravljanja vodama sliva Jadra i Žrnovnice – Prva faza studijsko istraživačkih radova EVV:1/2005. *Hrvatske vode*, Split.
- Kapelj, S; Kapelj, J. i Švonja, M. (2012.): Hidrogeološka obilježja sliva Jadra i Žrnovnice. *Tusculum*, Vol. 5, 205–216.
- Kapelj, S; Loborec, J. i Kapelj, J. (2013.): Assessment of aquifer intrinsic vulnerability by the SINTACS method. *Geologia Croatica*, Vol. 66, No. 2, doi: 10.4154/gc.2013.09.
- Lai E; Lundie S. i Ashbolt N.J. (2008.): Review of multi-criteria decision-aid for integrated sustainability assessment of urban water systems. *Urban Water Journal*, 5(4): 315–327.
- Loborec, J. (2013.): Procjena rizika od onečišćenja podzemnih voda u kršu na području sliva izvora Jadra i Žrnovnice. Doktorski rad, *RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu*, Zagreb 191 str.
- Loborec, J; Kapelj, S; Dogančić, D. i Ptiček Siročić, A (2014.): Assessment of Groundwater Vulnerability in Croatian Karstic Aquifer in Jadro and Žrnovnica Springs Catchment Area. U: Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems, (eds. B. Andreo, F. Carrasco, J.J. Duran, P. Jimenez, J.W. LaMoreaux), *Environmental Earth Sciences, Springer Verlag Berlin Heidelberg Vol. 1*, 397–407.
- Loborec, J; Kapelj, S. i Novak, H. (2015.): Analysis of ground water pollution hazard in karst: a case study of Jadro and Žrnovnica catchment area, *GRAĐEVINAR*, 67 (11), 1093–1103, doi: 10.14256/JCE.1250.2015
- Margat, J. (1968.): Vulnérabilitié des nappes d'eau souterraine à la pollution. *BRGM Publication 68 SGL 198 HYD*, Orléans.
- Mareschal, B (2014): Manual for Visual PROMETHEE Academic Edition 1.4. <http://www.promethee-gaia.net/academic-edition.html> (accessed on 19/2/2014).
- Meaški, H. (2011.): Model zaštite krških vodnih resursa na primjeru Nacionalnog parka "Plitvička jezera". Disertacija, *RGNF, Sveučilište u Zagrebu*, 210 str.
- Mladineo, N. (2009.): Podrška izvođenju i odlučivanju u graditeljstvu (manuskript za internu uporabu). *Gradjevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu*, Split, Hrvatska.
- Napolitano, P. i Fabbri, A.G. (1996.): Single parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS. *HydroGIS 96: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management (Proceedings of the Vienna Conference, April 1996.)*. *IAHS Publ. no. 235*, 559 – 566.
- Neukum, C. i Hötzl, H. (2007.): Standardization of vulnerability maps. *Environmental Geology* 51, 689 – 694.
- Neukum, C; Hötzl, H. i Himmelsbach, T. (2008.): Validation of vulnerability mapping methods by field investigations and numerical modelling. *Hydrogeology J.* 16, 641–658.

- Perrin, J; Pochon, A; Jeannin, P.-Y. i Zwahlen, F. (2004.): Vulnerability assessment in karstic areas: validation by field experiments. *Environmental Geology* 51, 689 – 694.
- Ravbar, N. i Goldscheider, N. (2007.): Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in *Slovenia*. *Acta Carsologica* 36/3, 397– 411.
- Ravbar, N. i Goldscheider, N. (2009.): Comparative application of four methods of groundwater vulnerability mapping in a Slovene karst catchment. *Hydrogeology Journal* 17, 725 – 733.
- Roy B. (1996): Multicriteria methodology for decision aiding. Kluwer Academic Publishers, *Dordrecht*, Nizozemska.
- Vás, J.M; Andreo, B; Perles, M.J. i Carrasco, F. (2005.): A comparative study of four schemes for groundwater vulnerability mapping in a diffuse flow carbonate aquifer under *Mediterranean climatic conditions*. *Environmental Geology* 47, 586 – 595.
- Vías, J.M; Andreo, B; Perles, M.J; Carrasco, F; Vadillo, I. i Jiménez, P. (2006.): Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. *Hydrogeology Journal*, 14, 912-925.
- Vidaček, Ž; Bogunović, M; Husnjak, S; Sraka, M; Bensa, A. i Petošić, D. (2004.): Tumač hidropedološke karte Republike Hrvatske, M 1:300 000. Zavod za pedologiju, *Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu*, Zagreb, 33 str.
- Vrba J. i Zaporozec A. (eds.) (1994): Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability, *International Contribution to Hydrogeology (IAH)*, Hannover, 131 str.
- Zwahlen, F. (2004.) (ed.): Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. European Commission, Directorate – *General for Research, European research area: structural aspects* – COST 620, 279 str.

IMPLEMENTATION OF MULTI-CRITERIAL ANALYSIS TO SELECTING THE OPTIMAL METHOD FOR INTRINSIC VULNERABILITY ASSESSMENT OF KARST AQUIFERS

Abstract. Methods for natural vulnerability assessment are based on the assumption that natural physical, chemical and biological characteristics of an aquifer system can provide some level of groundwater protection from pollution. The problem of the implementation of different vulnerability assessment methods in one area is due to relatively large differences in their final results as a consequence of certain subjectivity in assessments as well as data availability. For these reasons, increasingly more attention is paid to the implementation of appropriate methods to verify the results of vulnerability assessments, which all starts out with the selection of an optimal method. This paper will present the results of the implementation of four vulnerability assessment methods (SINTACS, EPIK, PI and COP) to a Croatian karst aquifer, the basin of the Jadro and Žrnovnica springs. This will be followed by the presentation of implementation of the multi-criterial analysis procedure by means of the PROMETHEE method which took into consideration different characteristic of individual methods. In this manner, the attempt was made to rank and select the most acceptable method for the implementation in the investigated area. Thus presented procedure could serve as a standard method for selecting the optimal method to be used in the investigated area with the purpose to verify the results of the natural vulnerability assessment of karst aquifers.

Key words: intrinsic vulnerability, karst aquifer, Jadro, Žrnovnica, multi-criterial analysis, verification

DIE ANWENDUNG DER MULTIKRITERIENANALYSE AUF DIE WAHL EINER OPTIMALEN METHODE ZUR ABSCHÄTZUNG DER NATÜRLICHEN VERSCHMUTZUNGSEMPFINDLICHKEIT DER KARSTGRUNDWASSERLEITER

Zusammenfassung. Die Methoden zur Abschätzung der natürlichen Verschmutzungsempfindlichkeit basieren auf der Annahme, dass natürliche physikalische, chemische und biologische Eigenschaften des wasserführenden Systems das Grundwasser vor Verschmutzung bis zu einem gewissen Grade schützen können. Bei der Anwendung verschiedener Methoden zur Abschätzung der Empfindlichkeit auf dem gleichen Gebiet besteht das Problem, dass die Endergebnisse große Unterschiede zeigen, die als Folge bestimmter subjektiver Abschätzungen und des Problems mit verfügbaren Angaben zu sehen sind. Folglich gewinnt die Anwendung entsprechender Methoden zur Verifizierung von Ergebnissen der Empfindlichkeitsabschätzung immer mehr an Aufmerksamkeit, wobei man mit der Wahl einer optimalen Methode beginnt. In diesem Artikel werden Ergebnisse der Anwendung von vier Methoden zur Abschätzung von Empfindlichkeit (SINTACS, EPIK, PI i COP) auf einem Karstgrundwasserleiter in Kroatien, nämlich auf dem Einzugsgebiet der Jadro- und der Žrnovnica-Quelle, gezeigt. Das Verfahren der Anwendung der Multikriterienanalyse anhand der Methode PROMETHEE, mit der verschiedene Eigenschaften einzelner Methoden betrachtet werden konnten, wird beschrieben. Anhand dieses Verfahrens versuchte man die akzeptabelste Methode zur Anwendung auf dem Untersuchungsgebiet zu wählen. Dieses Verfahren konnte auch als Standardmethode zur Wahl der optimalen Methode dienen, die auf dem Untersuchungsgebiet angewendet wird, um die Ergebnisse der Abschätzung der natürlichen Empfindlichkeit der Karstgrundwasserleiter zu verifizieren.

Schlüsselwörter: natürliche Verschmutzungsempfindlichkeit, Karstgrundwasserleiter, Jadro, Žrnovnica, Multikriterienanalyse, Verifizierung